PROTECTION DES PLANTATIONS DE FEUILLUS CONTRE LA VÉGÉTATION CONCURRENTE DANS LES FRICHES HERBACÉES : PLANTATION DE BEAUMONT – RÉSULTATS DE SEPT ANS

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N°142

Par

Denis Robitaille

Québec

104-01657/

PROTECTION DES PLANTATIONS DE FEUILLUS CONTRE LA VÉGÉTATION CONCURRENTE DANS LES FRICHES HERBACÉES : PLANTATION DE BEAUMONT – RÉSULTATS DE SEPT ANS

2003

MÉMOIRE DE RECHERCHE FORESTIÈRE N°142

Par

Denis Robitaille, ing.f., *Ph.D.*

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière

Mandat de la DRF

Le mandat de la Direction de la recherche forestière (DRF) au sein du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs est de participer activement à l'amélioration de la pratique forestière au Québec en réalisant des travaux principalement de long terme et d'envergure nationale, lesquels intègrent à la fois des préoccupations de recherche fondamentale et de recherche appliquée.

Les Mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité *ad hoc* formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document gratuit est tiré à 1 000 exemplaires. Il est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs
Forêt Québec, Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mrnfp.gouv.qc.ca
Internet : www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche

Note biographique

Denis Robitaille est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1983. En 1987, puis en 1994, la même institution lui décernait le diplôme de maître ès sciences et de docteur ès sciences (aménagement forestier et sylviculture). En 1986, il occupe un poste de chargé de cours à l'Université Laval (Protection des forêts contre le feu, Gestion du feu en forêt), puis en 1988, il entre à l'emploi de la Direction de la recherche forestière. Jusqu'en 1999, ses travaux de recherche ont porté principalement sur l'établissement et la protection des plantations des feuillus nobles. En outre, au cours de cette dernière période, il est devenu professeur associé au Département des sciences du bois et de la forêt de la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval. Depuis 1999, ses travaux portent sur la sylviculture des feuillus et sur le brûlage dirigé.

Remerciements

La pépinière de Berthierville a produit les plants nécessaires à la réalisation de cette expérience. L'implantation du dispositif sur le terrain, les mesurages, les cueillettes d'échantillons foliaires et de sol et une partie de la validation des données ont été supervisés par Monsieur François Lacombe, techn.for. Monsieur Réjean Villeneuve a réalisé les travaux de mise en terre des plants. Madame Julie Forgues, techn.for., et Monsieur Martin Dupuis, alors étudiant en aménagement des ressources forestières à l'Université Laval, ont participé activement aux travaux d'établissement du dispositif, de cueillette d'échantillons et de mesurage. Enfin, Madame Jolène Lemieux, techn.for., a finalisé la validation des données et Monsieur Louis Blais, statisticien, a réalisé la majorité des analyses statistiques. Les commentaires de Madame Marie-Claire Dumont et de Messieurs Alain Cogliastro et Jean-Claude Ruel ont été également très appréciés. Nos remerciements s'adressent aussi à Madame Sylvie Bourassa, pour la mise en page, et à Monsieur Pierre Bélanger, pour l'édition de cet ouvrage.

Résumé

Dans une plantation établie dans une friche herbacée, les effets sur le développement des plants de bouleau jaune, de chêne rouge, d'érable à sucre et de frêne d'Amérique de sept traitements de répression de la végétation concurrente ont été comparés. Les traitements comprenaient deux paillis organiques, trois paillis de plastique, une application annuelle de glyphosate au cours des trois premières années et un traitement témoin non désherbé. Dans les parcelles témoins et celles protégées par les paillis organiques, nous avons observé un fort taux de mortalité pour le bouleau jaune et l'érable à sucre. Les traitements ont eu peu d'effet sur la surface foliaire mais le paillis de polythène a permis aux feuillus de développer les feuilles les plus épaisses et les mieux pourvues en N, P, K et Ca. Pour toutes les espèces, le glyphosate et ie paillis de polythène ont permis aux arbres de développer les sujets les plus hauts et avec les plus gros diamètres. Après sept saisons de croissance, les différences de hauteur totale, de hauteur cumulative, de diamètre et de surface terrière entre les meilleurs traitements et les moins efficaces continuaient toujours de s'accroître. À la lumière des résultats obtenus, le paillis de polythène est le traitement le plus efficace, le plus durable et parmi les plus socialement acceptables.

Abstract

In a plantation established on a former farmland, seven weed control treatments were used to protect yellow birch, red oak, sugar maple, and white ash seedlings from herbaceous competition. Weed control treatments consisted in the use of two organic mulches, three plastic mulches, an annual application of glyphosate for the first three years, and a control. In the control plots and those protected with organic mulches, yellow birch and sugar maple showed high mortality rates. Weed control treatments had little effect on leaf area but all species showed thicker leaves, higher N, P, K, and Ca content with the polyethylene mulch. For the four species planted, glyphosate and polyethylene mulch were associated with the highest and largest trees. After seven years of growth, differences in total height, cumulative height, diameter and basal area between the best and less effecient treatments continued to progress. Polyethylene mulch appeared to be the most efficient, durable and socially acceptable weed control treatment.

Table des matières

PAGE

Remerciements iii

Résumé v

Abstract v

Liste des tableaux ix

Liste des figures xi

Introduction 1

CHAPITRE PREMIER - METHODES 3

1.1 Description de la station 3
1.2 Dispositif expérimental 3
1.3 Dates de réalisation des travaux 3
1.4 Paramètres mesurés, méthodes d'analyse et instruments de mesure 8
1.4.1 Le sol 8
1.4.2 Analyses foliaires 8
1.4.3 Paramètres morphologiques et dendrométriques 9
1.5 Analyses statistiques 9
1.5.1 Analyses foliaires 9
1.5.2 Paramètres morphologiques et dendrométriques 9

CHAPITRE DEUX - RÉSULTATS 11

2.1 Caractéristiques édaphiques 11
2.2 Mortalité 11
2.3 Analyses foliaires 13
2.3.1 Masse et surface foliaires et masse spécifique des feuilles 13
2.3.2 Masse spécifique des éléments majeurs dans les feuilles 13
2.4 Paramètres morphologiques et dendrométriques 13
2.4.1 Hauteur 13
2.4.2 Longueur de la pousse annuelle 16
2.4.3 Hauteur cumulative 21
2.4.4 Diamètre 23
2.4.5 Surface terrière 24
2.4.6 Proportion de tiges de 5 cm et plus de dhp en 1999 27

PAGE

CHAPITRE TROIS - DISCUSSION 29
3.1 Les caractéristiques édaphiques 29
3.2 Mortalité 29
3.3 Analyses foliaires 31
3.4 Paramètres morphologiques et dendrométriques 32
3.5 L'étude par les contrastes et les mesures répétées des paramètres morphologiques et dendrométriques 35

Conclusion 39

Références bibliographiques 41

Liste des tableaux

PAGE

Tableau 1 Caractéristiques édaphiques de la station de Beaumont (n = 28) et de sept stations expérimentales de plantations de feuillus au Québec et standards pour la production de plants d'érable à sucre 5

Tableau 2 Caractéristiques des plants lors de leur mise en terre à Beaumont (n = 360 par espèce) 6

Tableau 3 Description des traitements appliqués à la station de Beaumont 6

Tableau 4 Valeurs de p associées aux tests de t des contrastes orthogonaux sur la masse foliaire, la surface foliaire et la masse spécifique foliaire des quatre espèces feuillues, au cours de leur première saison de croissance (n = 28 par espèce) 14

Tableau 5 Valeurs de p associées aux test de t des contrastes orthogonaux sur les masses spécifiques des éléments nutritifs foliaires des quatre espèces feuillues, au cours de leur première saison de croissance (n = 28 par espèce) 16

Tableau 6 Tableau d'analyse de variance des mesures répétées sur la hauteur totale, la longueur de la pousse annuelle, la hauteur cumulative, le diamètre et la surface terrière pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique 18

Tableau 7 Comparaison de la hauteur totale des feuillus de Beaumont avec celle des feuillus de différentes stations, selon l'âge et le traitement de répression de la végétation concurrente 30

Liste des figures

PAGE

Figure 1 Localisation de la station expérimentale de Beaumont, région écologique 2b 4

Figure 2 Illustration des différents paillis utilisés dans la station expérimentale de Beaumont 7

Figure 3a Évolution du taux de mortalité selon l'espèce 12

Figure 3b Évolution de la mortalité du bouleau jaune entre 1996 et 1999 12

Figure 4 Masse foliaire moyenne, surface foliaire moyenne, masse foliaire spécifique moyenne au cour de la première saison de croissance en fonction des traitements de répression de la végétation concurrente (n = 36 par traitement et par espèce) 15

Figure 5 Masse spécifique des éléments foliaires majeurs au cours de la première saison de croissance en fonction des traitements de répression de la végétation concurrente (n = 28 par espèce) 17

Figure 6 Évolution des différences de hauteur moyenne entre les contrastes 19

Figure 7 Évolution des différences de longueur de la pousse annuelle moyenne entre les contrastes 20

Figure 8 Évolution des différences de hauteur cumulative moyenne entre les contrastes 22

Figure 9 Évolution des différences de diamètre moyen entre les contrastes 25

Figure 10 Évolution des différences de surface terrière moyenne entre les contrastes 26

Figure 11 Proportion des tiges ayant un dhp de 5 cm et plus après sept saisons de croissance (1999) 28

Figure 12 Moyennes de la hauteur totale, de la longueur de la pousse, de la hauteur cumulative, du dhp et de la surface terrière du bouleau jaune, du chêne rouge, de l'érable à sucre et du frêne d'Amérique après sept saisons de croissance (1999) 33

Introduction

Depuis le milieu des années 1980, on dénote une recrudescence de l'intérêt chez les forestiers, producteurs comme conseillers, pour la plantation des feuillus nobles. Alors qu'avant 1986 on ne produisait guère plus de deux cent mille plants l'an, depuis 1990 on met en terre chaque année plus d'un million de plants de feuillus pour la production de bois d'œuvre comme principal objectif (DUPUIS 1997, PATRY 1999), mais aussi pour l'acériculture, l'aménagement de haies brise-vent ou d'ouvrages de protection des berges contre l'érosion (DUMONT 1995). Les producteurs forestiers voient l'occasion de revaloriser leurs terres agricoles laissées à l'abandon (VON ALTHEN 1979, BAZIN 1990, ROBITAILLE 1994a, COGLIASTRO *et al.* 1998, LABRECQUE 1999) ou d'enrichir avec des feuillus de valeur leurs secteurs en friche et leurs jeunes peuplements d'espèces pionnières (TRUAX et GAGNON 1994, PATRY 1999) ou leurs forêts dégradées (TRUAX 1995, TRUAX *et al.* 2000). La Stratégie de protection des forêts (MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES 1994) et le plan d'action sur la diversité biologique (MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES 1996) proposés par le Gouvernement du Québec promeuvent d'ailleurs le reboisement comme technique de revalorisation des friches, en recommandant particulièrement la plantation des feuillus dans les régions du Québec méridional. En effet, cette activité contribue à maintenir le caractère feuillu dominant et productif du sud du Québec et, indirectement, à conserver la diversité du patrimoine naturel de cette région (DUMONT 1997).

La culture des feuillus exige toutefois des connaissances et des soins particuliers (DUMONT 1995), notamment en ce qui a trait à la maîtrise de la végétation concurrente en friche herbacée (ROBITAILLE 1994a). Les feuillus étant particulièrement sensibles à la concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs, la répression de la végétation concurrente est absolument nécessaire dans ce type d'environnement (DUPUIS 1997). Avec l'augmentation de la concurrence, le développement en hauteur des plants feuillus diminue, la concentration en éléments foliaires décroît et les dommages causés par les petits rongeurs augmentent (FERM *et al.* 1994). La densité des racines de la végétation concurrente dans les premiers centimètres du sol d'une friche herbacée pouvant atteindre cinquante fois celle des jeunes plants (NAMBIAR 1990), il est nécessaire de désherber la plantation pendant au moins les trois premières années pour augmenter les chances de réussite (VON ALTHEN 1990).

Quelques options s'offrent aux producteurs pour protéger adéquatement leur plantation de feuillus contre la végétation concurrente. La plus simple consiste à utiliser des phytocides pour préparer le terrain puis pour maîtriser la végétation concurrente jusqu'à la fermeture du couvert de la plantation (VON ALTHEN 1979). Cependant au Québec, cette méthode ne peut être préconisée car l'usage des phytocides dans les forêts publiques comme dans les forêts privées est dorénavant banni (MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES 1994). Il importe donc d'explorer d'autres avenues pour assurer aux feuillus plantés en friche herbacée des conditions de croissance favorables.

Les paillis forestiers peuvent constituer une solution efficace au problème de la concurrence au pied des plants, dès leur mise en terre, en créant des conditions environnementales propices à leur établissement et à leur développement (BAZIN 1990 ; MCDONALD et HELGERSON 1990 ; ROBITAILLE 1993a, 1993b, 1994b ; DUPUIS 1997, BALLEUX et VAN LERBERGHE 2001). C'est à l'égard de la disponibilité de l'eau du sol, de l'accès au rayonnement solaire et de la fertilité du sol que s'exercent les principaux effets des paillis sur les facteurs du milieu (MCDONALD et HELGERSON 1990 ; ROBITAILLE 1993a, 1993b ; DUPUIS 1997). De façon générale, les paillis augmentent la disponibilité de l'eau du sol, soit par leur action sur la transpiration, en limitant l'établissement de la végétation concurrente, ou sur l'évaporation, en réduisant les échanges gazeux sol-atmosphère (DAVIES 1988a). En dégageant les plants de leurs plus proches compétiteurs, les paillis leur permettent d'accéder à de meilleures conditions de lumière et de chaleur, l'effet étant proportionnel à la dimension du paillis (DAVIES 1988b). Enfin, les paillis peuvent aussi accélérer la vitesse de décomposition de la matière organique du sol par ses effets combinés sur la température et l'humidité du substrat (MCDONALD et HELGERSON 1990). En limitant la concurrence, les paillis améliorent la reprise des plants,

accélèrent leur croissance et réduisent considérablement les entretiens (BALLEUX et VAN LERBERGHE 2001).

Des travaux de recherche ont donc été amorcés pour évaluer l'efficacité des paillis forestiers dans quelques régions du Québec méridional, avec plusieurs espèces de feuillus et dans des conditions de sol et de friches différentes. Comme leurs effets sur les paramètres environnementaux des plants protégés dépendent de leur type, de leur dimension et de leur durabilité, plusieurs paillis ont été testés. Beaumont constitue une des stations expérimentales où ont été évalués des paillis forestiers en friche herbacée avec les quatre espèces de feuillus les plus utilisées en plantation : le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique.

L'objectif de cette expérience consiste donc à évaluer et à comparer les effets de cinq paillis forestiers disponibles sur le marché, d'un traitement d'herbicide et d'un traitement témoin sur la survie et le développement de quatre espèces feuillues plantées en friche herbacée. Dans le contexte du bannissement de l'usage des phytocides en milieu forestier, cette étude permettra d'identifier la meilleure solution de rechange possible pour assurer un développement adéquat des plantations de feuillus nobles en friche herbacée.

Chapitre premier

Méthodes

1.1 Description de la station

La figure 1 indique la position géographique de la station expérimentale de Beaumont, située à environ 40 km à l'est de la ville de Québec, sur la rive sud du Saint-Laurent (70° 57' 20" de longitude ouest et 46° 50' 45" de latitude nord). Cette station fait partie du sous-domaine de l'Est du Lac Saint-Pierre (région écologique 2b), dans le domaine bioclimatique de l'érablière à tilleul (ANSSEAU *et al.* 1996). À cet endroit, la longueur moyenne de la période sans gel est de 125 à 140 jours l'an (probabilité de 90 %) (DUBÉ *et al.* 1982), la température moyenne annuelle oscille entre 3 et 4,5 °C (- 12 °C en janvier et 19 °C en juillet) et la quantité totale de précipitations est d'environ 1 000 mm par an, dont 250 mm tombent sous forme de neige (FERLAND et GAGNON 1974).

Le sol de la station est profond et le drainage est bon (3). Sa texture varie entre le loam sableux et le loam sablo-argileux, provenant d'un dépôt marin en eau peu profonde. Le tableau 1 présente quelques caractéristiques physico-chimiques du sol de cette station, dont des échantillons ont été prélevés à des profondeurs de 0-10 cm et 10-20 cm. À titre de comparaison, le tableau contient également des informations sur le sol de sept plantations de feuillus réalisées au Québec ainsi qu'un registre de valeurs optimales pour la culture de l'érable à sucre.

1.2 Dispositif expérimental

Quatre espèces feuillues ont été plantées à Beaumont, à une densité de 1 667 plants/ha (espacement de 2 m x 3 m) : le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique. Une description des caractéristiques morphologiques des plants apparaît au tableau 2. Sept traitements de protection contre la végétation concurrente ont été appliqués sur le terrain. Cinq de ces traitements sont constitués de différents types et dimensions de paillis. Il y a trois paillis de plastique individuels carrés : le paillis de polythène noir de 1,5 m de côté, le paillis Brush Blanket® de 90 cm de côté et le paillis Weedmat® de 92 cm de côté. Il y a aussi deux paillis composés de matériaux organiques : le Cellu-Fib®, paillis de carton carré de 90 cm de côté, et le PS-30 Tree Ring®, un paillis de paille circulaire de 91 cm de diamètre. Les deux autres traitements sont une application annuelle d'un phytocide (glyphosate) au cours des trois premières saisons de croissance, pour respecter les recommandations de VON ALTHEN (1990), et un traitement témoin, sans intervention de protection. La description complète de ces traitements apparaît au tableau 3 et des photos de ces différents paillis sont présentées à la figure 2.

Le dispositif expérimental respecte les modalités d'un plan factoriel à blocs complets aléatoires (KIRK 1982), comprenant quatre blocs de sept parcelles. Toutes les espèces feuillues sont présentes dans chacune des parcelles et elles sont réparties au hasard en groupes de trois rangées contiguës de cinq plants. Le dispositif comporte donc 420 plants par espèce (4 blocs x 7 parcelles x 15 plants par espèce), pour un total général de 1 680 plants, toutes espèces et tous traitements confondus.

1.3 Dates de réalisation des travaux

Avant la mise en place du dispositif expérimental, le sol de la station a été labouré à une profondeur minimale de 20 cm, puis rotoculté à deux reprises au printemps 1993. La mise en terre des plants a été réalisée entre le 14 et le 18 mai 1993 puis les paillis ont été installés au pied des plants, dans les parcelles prévues à cet effet, dans les cinq jours qui ont suivi la mise en terre. À la fin mai 1993, lorsque le chiendent [*Agropyron repens* (L.) Beauv.] a atteint le stade de trois feuilles dans les parcelles de phytocide, un premier traitement de glyphosate a été effectué à l'aide d'un vaporisateur à dos, à raison de 6 l/ha d'ingrédient actif. On a pris soin de recouvrir au préalable les plants feuillus d'un sac de plastique. Les deux années suivantes, le glyphosate a été appliqué lorsque le chiendent atteignait le même stade de développement dans les parcelles avoisinantes, l'usage du phytocide ayant éliminé sa présence dans les parcelles traitées.

De manière à réduire la probabilité de dommages causés par les rongeurs, la végétation concurrente a été fauchée dans toutes les parcelles, à la fin de l'été, avec une débroussailleuse sur roues. Cette intervention n'a aucun effet sur la croissance des plants car la concurrence qu'ils

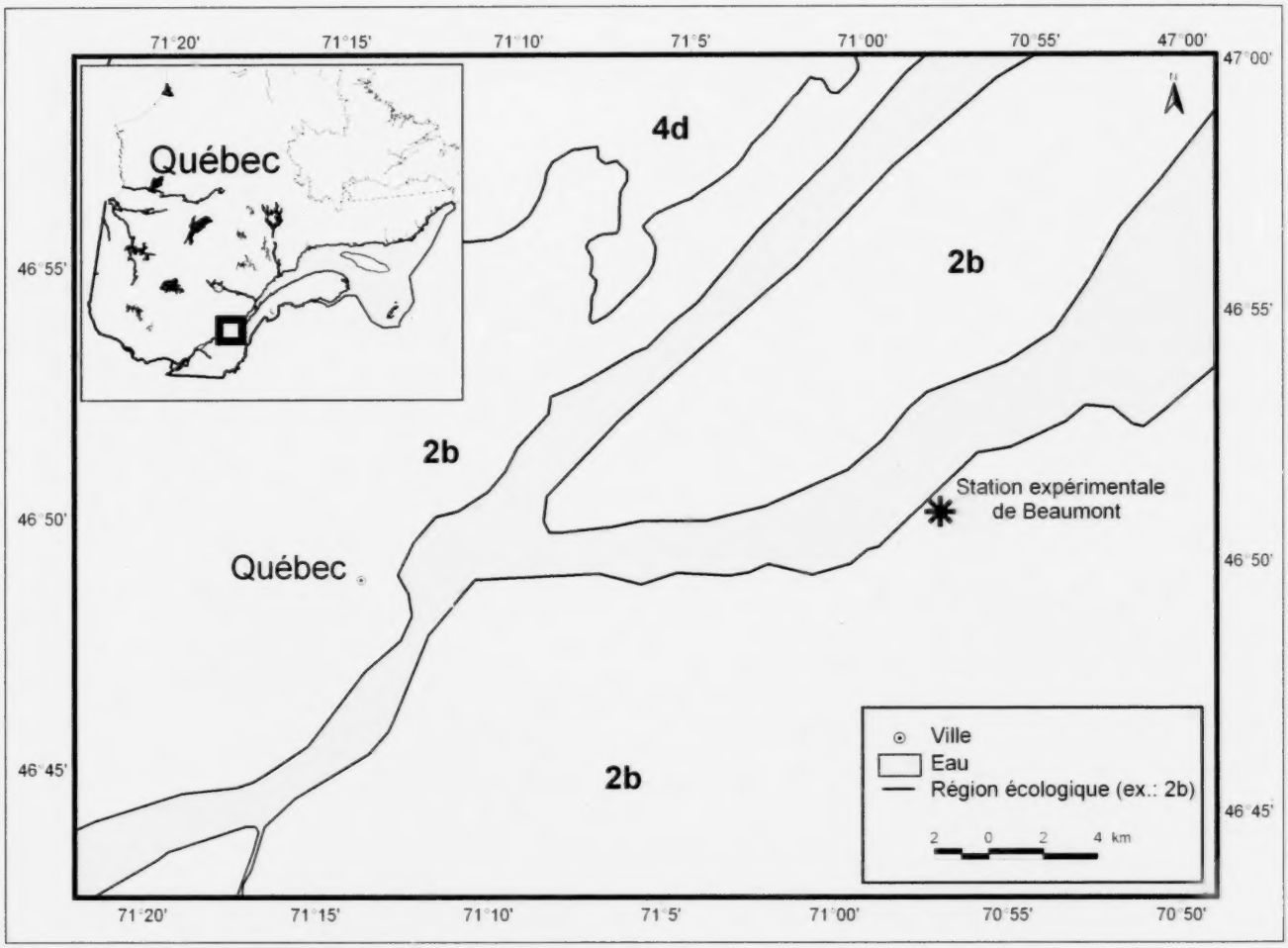


Figure 1

Localisation de la station expérimentale de Beaumont, région écologique 2b.

subissent s'exerce davantage pour l'eau et les éléments nutritifs du sol (DUMONT 1995, VON ALTHEN 1984). Certaines années, la densité des herbacées étant très forte, il a fallu procéder à deux fauchages, un premier vers la mi-juillet et un second vers le début de septembre. Enfin, vers la mi-octobre de chaque année, un rodenticide (Ramik brun®) était répandu au pourtour du dispositif en une ou deux applications espacées de deux à trois semaines.

Pendant les quatre premières années, des travaux de taille de formation et d'élagage ont été réalisés sur la majorité des tiges vivantes du dispositif. La fréquence des interventions variait selon l'espèce, la vitesse de croissance des arbres, la présence de défauts de forme ou de bris dans la tige ou encore la manifestation de signes et symptômes de maladies. À compter de la cinquième année, les jeunes arbres qui présentaient des défauts de forme n'ont plus été taillés ou élagués, leur rôle étant désormais limité à occuper l'espace pour permettre aux tiges d'avenir de mieux se développer en ambiance forestière. Quelques arbres grugés par les rongeurs ont dû être recépés, quelques bouleaux jaunes gravement atteints par le *Phomopsis* et quelques

Tableau 1

Caractéristiques édaphiques de la station de Beaumont (n = 28) et de sept stations expérimentales de plantations de feuillus au Québec et standards pour la production de plants d'érable à sucre

Station	pH	M.O. (%)	CÉC (méq/100 g)	S.B. (%)	N min. (mg/kg)	P ass. (mg/kg)	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)
Beaumont 0-10 cm	4,3*	5,0	20,5	12,9	19,4	221,3	67,2	15,3	17,5
Beaumont 10-20 cm	4,3*	4,6	20,4	12,6	21,8	222,2	68,2	14,9	16,9
(1) site « Terrace »	7,7	1,9			2,7	145	38	22	39
(1) site « River »	6,6	4,5			3,7	117	34	27	38
(2) site « marin »	5,7				19	8,4	28	36	36
(2) site « bourrelet »	6,7				19	8,9	38	30	32
(2) site « chenail »	6,3				14	2,6	55	20	25
(2) site « littoral »	5,0				15	1,0	78	4	18
(3) site « stony littoral »	6,4	5	10		11	69	72	19	9
(3) site « sandy beach »	5,9	5	3		8	104	86	7	7
(3) site « dry-mesic moraine »	7,4	8	16		16	31	31	43	26
(3) site « mesic moraine »	7,4	15	15		16	106	54	31	15
(3) site « morainic ridge »	7,6	11	17		14	24	36	41	23
(3) site « wet marine »	6,3	7	11		7	41	57	28	15
(4) site « argile »	6,5	13	32		0,6				
(4) site « loam »	7,2	11	22		0,5				
(4) site « sable loameux »	6,1	6	17		0,4				
(5) Sainte-Julie-de-Verchères	7,1				2,8	191	39	21	40
(6) site « forest »	4,0					3,1	72	16	12
(6) site « clear-cut »	4,2					3,3	74	15	11
(6) site « field »	5,4					3,8	74	16	10
(7) site « old-field »	5,1				15	105	37	43	20
(7) site « old-field herbicide »	5,0				24	93	36	42	22
(8) Standards Érable à sucre									
Minimum	5,0		10		20	50		30 % limon + argile	
Maximum	7,5		20		45	150		50 % limon + argile	

* pH au $CaCl_2$

Références et localisation :

(1) Cogliastro *et al.* (1990), Sainte-Julie-de-Verchères (Terrace) et Saint-Louis-de-Richelieu (River)
(2) Cogliastro *et al.* (1993), MRC Haut-Saint-Laurent
(3) Cogliastro *et al.* (1997), MRC Haut-Saint-Laurent
(4) Cogliastro *et al.* (2000), Huntingdon
(5) Truax et Gagnon (1993), Sainte-Julie-de-Verchères
(6) Truax *et al.* (1994), Ascot Corner
(7) Truax *et al.* (2000), Saint-Benoît-du-Lac
(8) Robitaille (1995)

Tableau 2

Caractéristiques des plants lors de leur mise en terre à Beaumont (n = 360 par espèce)

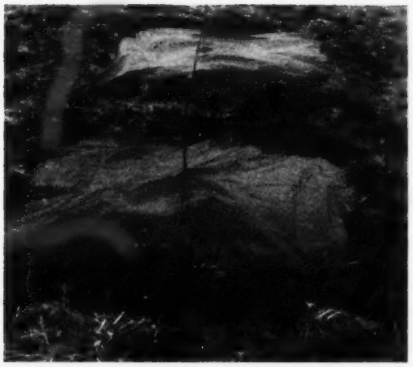
Espèce	Type de plants	Hauteur[1] (cm)	Diamètre[1] (mm)	H/D[1]
Bouleau jaune	Plants de 1 an (1-0) en récipients de 340 ml la cavité, de la catégorie 20-55 cm de hauteur	46,6 (3,9)	4,8 (0,7)	9,9 (1,6)
Chêne rouge	Plants de 2 ans (2-0) à racines nues, de la catégorie 50-90 cm de hauteur	61,3 (11,0)	8,9 (1,6)	7,0 (1,3)
Érable à sucre	Plants de 2 ans (2-0) à racines nues, de la catégorie 50-90 cm de hauteur	55,5 (9,4)	8,0 (1,6)	7,1 (1,5)
Frêne d'Amérique	Plants de 2 ans (2-0) à racines nues, de la catégorie 50-90 cm de hauteur	54,4 (7,9)	7,0 (1,2)	7,8 (1,2)

[1] Les valeurs de l'écart-type sont affichées entre parenthèses

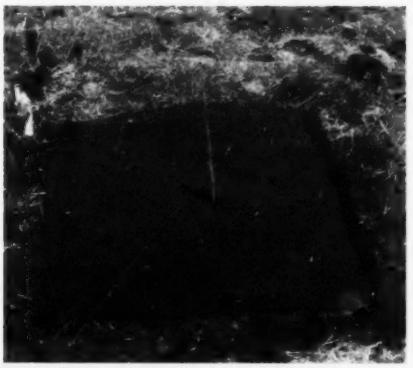
Tableau 3

Description des traitements appliqués à la station de Beaumont

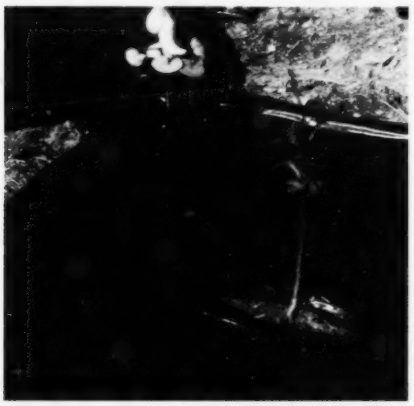
Traitement	Description
Témoin	Aucune protection appliquée au pied des plants. Fauchage une ou deux fois la saison à l'intérieur des rangs et entre les plants.
Glyphosate	Une application annuelle de 6 l/ha de glyphosate sur toute la surface des parcelles au cours des trois premières saisons de croissance, lorsque le chiendent atteint le stade de trois feuilles. Fauchage une ou deux fois la saison à l'intérieur des rangs et entre les plants.
Polythène	Paillis individuel de polyéthylène noir embossé, épaisseur de 0,07 mm, carré de 1,5 m de côté (2,25 m^2, qualifié de grandes dimensions), ancré au sol par recouvrement des bordures avec de la terre. Fauchage une ou deux fois la saison à l'intérieur des rangs et entre les plants.
Weed Mat®	Paillis individuel de polyéthylène noir microperforé, carré de 0,92 m de côté (0,85 m^2, qualifié de petites dimensions), épaisseur 0,07 mm, ancré au sol par quatre agrafes métalliques. Fauchage une ou deux fois la saison à l'intérieur des rangs et entre les plants.
Brush Blanket®	Paillis individuel de polyéthylène IRT-76 vert microperforé, carré de 0,9 m de côté (0,81 m^2, qualifié de petites dimensions), épaisseur de 0,05 mm, ancré au sol par quatre agrafes métalliques. Fauchage une ou deux fois la saison à l'intérieur des rangs et entre les plants.
PS30 Tree Ring®	Paillis individuel circulaire constitué de paille (matériau organique) collée à un papier filtre imbibé d'un fertilisant soluble (6-18-6), diamètre de 0,91 m (0,65 m^2, qualifié de petites dimensions), épaisseur de 6 mm, aucun ancrage au sol. Fauchage une ou deux fois la saison à l'intérieur des rangs et entre les plants.
Cellu-Fib®	Paillis individuel constitué de fibres recyclées de carton (matériau organique), ciré sur les deux faces, carré de 0,9 m de côté (0,81 m^2, qualifié de petites dimensions), épaisseur de 0,2 mm, ancré au sol par cinq agrafes métalliques. Fauchage une ou deux fois la saison à l'intérieur des rangs et entre les plants.



a) Paillis de polythène noir, 1,5 m de côté, ancré au sol par de la terre déposée sur les bordures



b) Paillis Weedmat®, 0,92 m de côté, ancré au sol à l'aide de quatre agrafes métalliques



c) Paillis Brush Blanket®, 0,9 m de côté, ancré au sol à l'aide de quatre agrafes métalliques

d) Paillis PS30 Tree Ring®, 0,91 m de diamètre, aucun ancrage au sol

e) Paillis Cellu-Fib®, 0,9 m de côté, ancré au sol à l'aide de cinq agrafes métallique

Figure 2

Illustration des différents paillis utilisés dans la station expérimentale de Beaumont.

érables à sucre touchés par le *Cylindrocarpon destructans* ont dû être retirés de la plantation. Pour des raisons évidentes, tous ces arbres ont été retranchés de l'analyse statistique.

1.4 Paramètres mesurés, méthodes d'analyse et instruments de mesure

1.4.1 Le sol

Des échantillons de sol (28) ont été prélevés à l'automne 1992, l'année précédant l'établissement de la plantation, de manière à bien caractériser la station et à estimer la variation de ses principales caractéristiques physicochimiques. Les échantillons prélevés à la tarière ont été divisés en deux strates, soit 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur. Les échantillons ont été séchés à l'air libre puis tamisés (mailles de 2 mm). Une partie de l'échantillon a également été broyée pour déterminer les valeurs totales du carbone (matière organique). Plusieurs analyses ont été réalisées et les principaux résultats figurent au tableau 1.

Le pH a été mesuré en utilisant 10 g de l'échantillon dans 20 mL d'une solution de $CaCl_2$ (0,01 M). Le pH de la solution a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné (Walsh 1971, McKeage 1978). La concentration en NO_3 et NH_4 extractibles (N minéral) a été déterminée par extraction sur 3 g de l'échantillon de sol dans une solution de KCl 2 M pendant trente minutes. L'échantillon a été filtré et l'azote minéral dosé par colorimétrie avec un spectrophotomètre à flux continu (modèle Quickchem AE de Lachat) (Canadian Society of Soil Science 1993). Le phosphore assimilable a été dosé par la méthode Bray 2. Une extraction a été réalisée sur un spécimen de l'échantillon (0,5 g) avec une solution mixte de fluorure d'ammonium et d'acide chlorhydrique (Bray 2) pendant trente minutes. L'échantillon a été filtré et le phosphore dosé par colorimétrie avec un spectrophotomètre à flux segmenté (Technicon®) (McKeage 1978).

La capacité d'échange cationique (CÉC) et la saturation en base (SB) ont été déterminées par extraction avec de l'acétate d'ammonium. Pour obtenir les bases échangeables, une extraction sur un spécimen de l'échantillon (4 g) a été faite dans une solution d'acétate d'ammonium 1 M (non tamponnée) pendant trente minutes. L'échantillon a été filtré et les métaux dosés par spectrométrie d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 61E ou ICAP 9000 de Thermo Instruments) (Canadian Society of Soil Science 1993). L'acidité totale a été déterminée par extraction sur un spécimen de l'échantillon (1 g) avec une solution de $BaCl_2$ et de triéthanolamine pendant trente minutes. L'échantillon a été filtré et l'acidité déterminée par volumétrie en titrant l'excès de base avec une solution étalonnée d'acide chlorhydrique (McKeage 1978, Canadian Society of Soil Science 1993). La CÉC et la SB ont été obtenues par calcul : CÉC = somme des bases échangeables + acidité totale, SB = somme des bases échangeables / CÉC.

La détermination du carbone et de la matière organique a été faite à l'aide de la méthode Walkley & Black. Le carbone organique (entre 0,1 et 1,0 g d'échantillon) a été oxydé en présence d'une solution de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. Après l'oxydation, l'excès de bichromate a été titré à l'aide d'une solution étalonnée d'un sel ferreux. La matière organique (MO) a été calculée en multipliant la valeur du carbone par 1,724 (Black 1965). L'analyse granulométrique a été réalisée en portant en suspension dans l'eau un spécimen de l'échantillon (50 g). On a mesuré l'évolution dans le temps de la masse spécifique du milieu à l'aide d'un hydromètre gradué en grammes de sol au litre de suspension (méthode de Bouyoucos). La classe des textures a été obtenue grâce à l'abaque de classification des sols (McKeage 1978).

1.4.2 Analyses foliaires

À la fin juillet de la première saison de croissance (1993), un prélèvement d'échantillons foliaires a été réalisé. Trois feuilles sur trois arbres par espèce, choisis au hasard dans chacune des parcelles, ont alors été récoltées puis déposées dans une glacière. La surface foliaire a été évaluée quelques heures après la récolte des feuilles à l'aide d'un appareil Licor 3000. La masse des feuilles a été mesurée après un séchage de 48 heures dans une étuve à 65 ºC. Elles ont ensuite été broyées pour l'analyse des éléments majeurs (N, P, K, Mg, Ca). La concentration foliaire de ces éléments a été déterminée par digestion de 200 mg de tissus avec de l'acide sulfurique concentré en présence de sélénium et de peroxyde d'hydrogène à 370 °C pendant une heure. Après dissolution complète, P, K, Ca et Mg ont été dosés directement dans la solution acide diluée, par spectrométrie d'émission atomique au plasma (modèle ICAP 61E ou ICAP 9000 de Thermo Instruments). L'azote, sous forme d'ammonium, a été dosé par colorimétrie avec un spectrophotomètre à flux continu (modèle Quickchem 8000 de Lachat) (Canadian Society of Soil Science 1993, Walinga *et al.* 1995). La masse spécifique des feuilles a été calculée (masse totale/surface foliaire totale) puis utilisée pour calculer la masse spécifique des éléments nutritifs analysés (concentration de l'élément x masse spécifique).

1.4.3 Paramètres morphologiques et dendrométriques

Immédiatement après la mise en terre des plants, on a procédé à l'évaluation de leur état de santé et au mesurage de leur hauteur totale et de leur diamètre au collet (Tableau 2). Les plants de chêne rouge, d'érable à sucre et de frêne d'Amérique respectaient ou surpassaient les gabarits recommandés par VON ALTHEN (1990) et CARL (1982). Pour le bouleau jaune, espèce produite en récipients, aucune recommandation sur le gabarit des plants ne figure dans la littérature. Les bouleaux jaunes plantés à Beaumont excédaient tout de même en dimensions ceux de GRABER (1978) et de HOYLE (1984) et étaient comparables à ceux utilisés par HANNAH et TURNER (1981). La hauteur et le diamètre des jeunes tiges ont été mesurés à la fin des sept saisons de croissance suivantes, en plus de la longueur de la pousse annuelle et du dhp lorsque la tige atteignait une hauteur 1,3 m. Le diamètre au collet n'a plus été mesuré à compter de la sixième saison car presque tous les arbres avaient atteint une hauteur supérieure à 1,3 m. On a aussi évalué quelques paramètres dendrométriques. On a ainsi calculé la hauteur cumulative (m/ha), la somme des hauteurs de toutes les tiges observées à l'intérieur d'une parcelle exprimée en fonction d'une superficie d'un hectare (DORAIS 1991), qui intègre le taux de survie et la hauteur moyenne selon l'espèce et selon le traitement. Nous avons aussi calculé la surface terrière à chaque année ainsi que la proportion des tiges ayant atteint 5 cm et plus au dhp en 1999, selon l'espèce et selon le traitement.

1.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées sur chacune des espèces prises individuellement. Les effets des traitements de protection contre la végétation concurrente sur les différentes variables à l'étude ont été comparés en utilisant la série suivante de six contrastes orthogonaux déterminés *a priori* (les détails des traitements figurent au tableau 3) :

1- tous les traitements de répression de la végétation concurrente confondus (paillis et glyphosate confondus) contre le traitement témoin ;

2- les paillis de plastique (polythène, Weed Mat®, Brush Blanket®) contre les paillis organiques (Cellu-Fib®, PS30 Tree Ring®) ;

3- le paillis de polythène contre le glyphosate ;

4- le paillis de polythène contre les autres paillis de plastique (Weed Mat® et Brush Blanket®) ;

5- le paillis Cellu-Fib® contre le paillis PS30 Tree Ring® ;

6- les grand paillis (polythène) contre les petits paillis (Cellu-Fib®, PS-30 Tree Ring®, Weed Mat® et Brush Blanket®).

Cette série de contrastes permet de déterminer si les arbres connaissent un meilleur développement quand l'on maîtrise la végétation concurrente (contraste 1) ; s'il est préférable d'utiliser des paillis de plastique plutôt que des paillis organiques (contraste 2) ; de déterminer, pour les paillis organiques, lequel est le plus intéressant parmi les deux à l'étude (contraste 5) ; de déterminer si le paillis de polythène donne de meilleurs résultats que les autres types de paillis de plastique (contraste 4), que les paillis de plus petites dimensions (contraste 6) et que l'application annuelle de glyphosate au cours des trois premières saisons de croissance (contraste 2).

1.5.1 Analyses foliaires

Les données d'analyses foliaires portent sur l'année 1993, soit l'année de l'établissement de la plantation. Cette année-là, les traitements de répression de la végétation concurrente exprimaient leur efficacité maximale, notamment pour les paillis faits de matériaux organiques qui ont amorcé leur décomposition l'année suivante.

L'analyse des données de masse des feuilles, surface foliaire, de masse spécifique des feuilles et de masse spécifique des éléments foliaires N, P, K, Ca et Mg ont été traitées par ANOVA. Les contrastes orthogonaux *a priori* ont été utilisés pour comparer les effets des traitements sur le développement foliaire. L'hypothèse nulle de l'égalité des contrastes est rejetée lorsque la valeur de p associée aux tests de t portant sur les contrastes est inférieure ou égale à 0,05.

1.5.2 Paramètres morphologiques et dendrométriques

Pour la majorité des paramètres morphologiques et dendrométriques, on dispose de données à chaque année, dont la récurrence nous permet d'utiliser l'analyse de variance des mesures répétées. L'évolution des paramètres suivants a été analysée dans le contexte de l'analyse des mesures répétées : la hauteur totale, la longueur de la flèche terminale, le diamètre au collet (dhs) ou le diamètre à hauteur de poitrine (dhp) ainsi que les paramètres dendrométriques de la hauteur cumulative et de la surface terrière. Lorsque l'analyse des mesures répétées indique qu'il existe des différences entre les traitements et qu'il n'y a pas de parallélisme

entre les profils de la variable indépendante dans le temps, nous avons étudié les contrastes annuels pour vérifier comment se distinguaient les traitements à chaque année. L'hypothèse nulle de l'égalité des contrastes est rejetée lorsque la valeur de p associée aux tests de t sur les contrastes annuels est inférieure ou égale à 0,05.

Les analyses statistiques des paramètres morphologiques et dendrométriques en mesures répétées ont été réalisées avec la procédure MIXED de SAS (version 8) (SAS INSTITUTE INC. 1999). Cette procédure a l'avantage de prendre en compte dans les modèles toute l'information sur le développement des arbres qui meurent pendant l'expérience, jusqu'à leur dernière saison de croissance. Pour s'assurer que la mortalité est associée à l'effet des traitements et non à la faiblesse initiale des plants, seuls les jeunes arbres ayant survécu aux deux premières saisons de croissance ont été utilisés dans les calculs.

Un autre avantage majeur de la procédure MIXED est que l'analyse des mesures répétées peut être réalisée en tenant compte de l'hétérogénéité de la variance ainsi que de la structure variable de la matrice des corrélations entre les années de mesure. La procédure MIXED offre la possibilité de choisir parmi une multitude de structures, celle qui est la plus appropriée. Dans le cas de ce dispositif expérimental, la structure autorégressive d'ordre 1 est celle qui s'adapte le mieux aux données. Mentionnons également que la normalité des résidus est respectée dans toutes les analyses.

Étant donné que l'analyse n'est pas balancée, à cause de la mortalité qui survient pendant l'expérience, les calculs des degrés de liberté ont été faits en utilisant l'approximation de Satterthwaite. Avec cette approximation, on obtient des degrés de liberté qui ne sont pas nécessairement des nombres entiers. On a également déterminé pour chaque espèce et pour quelques paramètres étudiés, la pertinence d'utiliser le diamètre au collet et la hauteur initiale comme covariables dans les modèles d'analyse.

Les modèles statistiques que nous avons employés pour l'analyse sont les suivants :

1- modèle sans covariable :

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

où μ est la moyenne générale ; β, γ et $(\beta\gamma)$ sont les effets fixes des traitements, des années et de l'interaction entre les traitements et les années respectivement ; τ et $(\tau\beta)$ sont les effets aléatoires associés aux blocs et à l'interaction entre les blocs et les traitements ; $(\tau\beta\gamma)$ est l'erreur expérimentale et ε est l'erreur d'échantillonnage.

2- modèle avec covariable :

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \alpha X_{ijkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

où μ est la moyenne générale ; β, γ et $(\beta\gamma)$ sont les effets fixes des traitements, des années et de l'interaction entre les traitements et les années ; τ et $(\tau\beta)$ sont les effets aléatoires associés aux blocs et à l'interaction entre les blocs et les traitements ; $(\tau\beta\gamma)$ est l'erreur expérimentale ; X est la covariable du modèle et α sa pente puis ε est l'erreur d'échantillonnage.

Il est à noter que pour la mortalité, seuls le bouleau jaune et l'érable à sucre ont fait l'objet d'une analyse statistique. Pour le bouleau jaune, étant donné la corrélation assez faible entre les données d'une année à l'autre, nous avons procédé à une ANOVA et à la comparaison des moyennes multiples (Duncan) pour chacune des années, prises individuellement. Pour l'érable à sucre, une simple observation des moyennes et de leur intervalle de confiance a suffi pour identifier les traitements associés à une mortalité plus ou moins forte. Pour le chêne rouge et le frêne d'Amérique, la mortalité a été très faible et une analyse sommaire des données a démontré qu'aucun effet de traitements ne pouvait être dégagé. La proportion de tiges de 5 cm et plus au dhp a été calculée pour l'année 1999 seulement et les différences entre les traitements ont été établies par l'observation des moyennes et de leur intervalle de confiance, comme pour les données de mortalité de l'érable à sucre.

Chapitre deux

Résultats

2.1 Caractéristiques édaphiques

Les caractéristiques physico-chimiques du sol de la station de Beaumont sont homogènes si l'on considère les résultats d'analyse des deux strates d'échantillonnage (Tableau 1). La situation découle sûrement des antécédents culturaux de la station ; cette terre ayant été labourée et hersée à maintes reprises par le passé pour la production de fourrage. En comparant les caractéristiques édaphiques de Beaumont avec celles d'autres plantations de feuillus (COGLIASTRO *et al.* 1990, 1993 1997, 2000 ; TRUAX et GAGNON 1993 ; TRUAX *et al.* 1994) et avec les normes de fertilité du sol pour l'érable à sucre (ROBITAILLE 1995), le sol de la station de Beaumont convient à la plupart des exigences nutritionnelles des feuillus nobles (Tableau 1). La capacité d'échange cationique et la concentration en azote minéral et en phosphore assimilables à Beaumont sont supérieures à la majorité des autres sites de plantation et satisfont à l'érable à sucre (YAWNEY 1982, ROBITAILLE 1995), espèce la plus exigeante des quatre quant à la fertilité du sol (COGLIASTRO *et al.* 1997). La texture (loam sableux à loam sablo-argileux) et le contenu en matière organique du sol conviennent également aux quatre espèces plantées (VON ALTHEN 1990, DUMONT 1995, ROBITAILLE 1995, COGLIASTRO *et al.* 1997).

Cependant, le pH du sol est un peu faible par rapport aux plantations de référence et au registre de pH proposé pour la production de l'érable à sucre et du frêne d'Amérique (YAWNEY 1982, DUMONT 1995, ROBITAILLE 1995). Bien que le pH du sol de Beaumont ait été mesuré dans une solution de $CaCl_2$ et que ce procédé donne généralement des valeurs de quelques dixièmes d'unités plus faibles que celui du pH mesuré dans l'eau, l'écart entre le pH du sol de Beaumont et celui des autres plantations demeure quand même important. Le guide sur la plantation des feuillus nobles du Québec (DUMONT 1995) recommande les registres de pH à l'eau suivants : bouleau jaune de 4,5 à 8,0, chêne rouge de 4,8 à 6,5, érable à sucre de 5,5 à 7,5 et frêne d'Amérique de 5,0 à 7,5. Le sol de la station de Beaumont serait donc d'une fertilité relativement faible, si l'on prend en compte le pH seulement, particulièrement pour l'érable à sucre et le frêne d'Amérique ; les autres caractéristiques édaphiques étant toutefois adéquates à la culture des feuillus.

2.2 Mortalité

Après sept saisons de croissance, la mortalité du chêne rouge et du frêne d'Amérique est demeurée inférieure à 4 % et aucun effet de traitement n'a pu être décelé (Figure 3a). L'analyse de la mortalité ne portera donc que sur l'érable à sucre et le bouleau jaune. À compter de 1997, le taux de mortalité de l'érable à sucre est devenu significativement plus élevé pour le témoin (35,4 %) que dans les autres traitements, où la mortalité est demeurée, somme toute, assez faible (inférieure à 13 %). Aucune autre différence significative n'a pu être décelée entre les autres traitements. Cette année-là, la présence de *Cylindrocarpon destructans* dans les racines d'érable à sucre a été décelée dans la plantation. Le pathogène détruisait progressivement le système racinaire des jeunes érables, au point de nuire à leur stabilité et de provoquer leur mort par le bris de la tige au niveau du sol.

Entre 1996 et 1998, plusieurs bouleaux jaunes ont été touchés par le *Phomopsis*, stade des conidies du pathogène *Diaporthe alleghaniensis*. Ce champignon affecte la tige des jeunes bouleaux jaunes et cause un dépérissement général de l'arbre (SINCLAIR *et al.* 1987). Il a parfois un effet dévastateur dans les jeunes plantations. Les bouleaux présentant les signes et symptômes de cette maladie ont été immédiatement abattus et retirés de la plantation. Des différences significatives de mortalité pour le bouleau jaune ont été notées à partir de 1996 (Figure 3b). Le témoin et le paillis PS30 Tree Ring® se démarquent des autres traitements par leur taux de mortalité significativement plus élevé que la majorité des autres traitements. En 1996, le paillis PS30 Tree Ring® n'était pas différent du paillis Cellu-Fib® et du paillis Brush Blanket® et en 1999, il ne différait pas du paillis Cellu-Fib®. Par ailleurs, en 1996 et 1997, le traitement phytocide obtenait un taux de mortalité significativement inférieur à celui du paillis Cellu-Fib® et du paillis Brush Blanket®. Puis, en 1998 et 1999, la mortalité du bouleau jaune dans les parcelles traitées à l'herbicide s'étant accrue alors que celle des autres traitements se stabilisait, ces dernières différences se sont estompées.

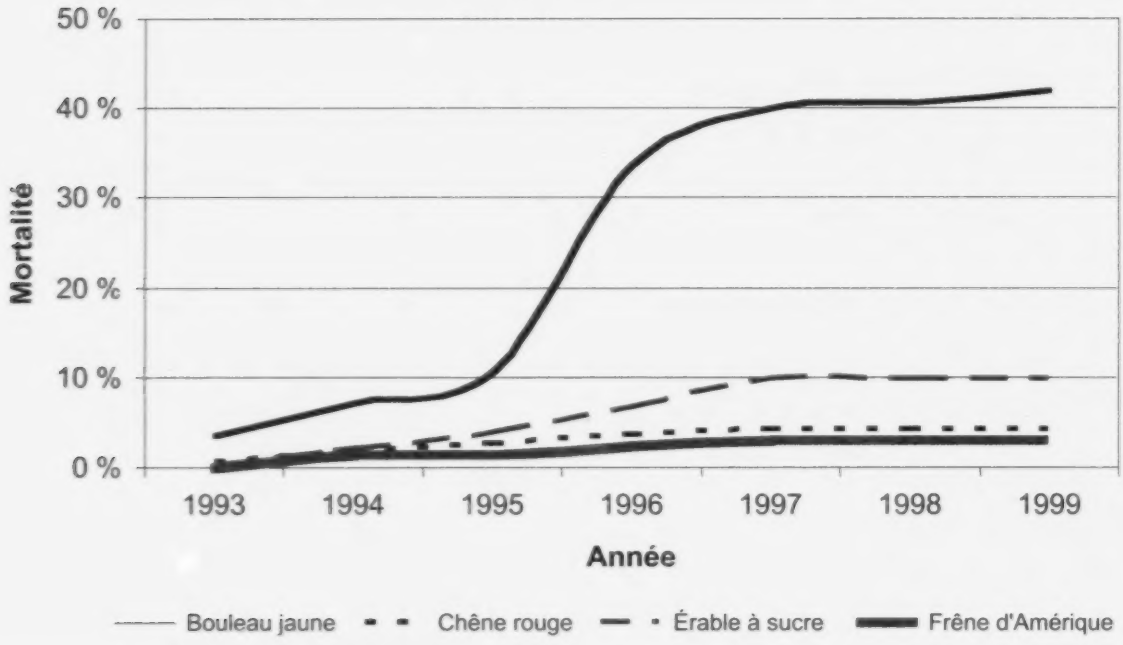


Figure 3a

Évolution du taux de mortalité selon l'espèce.

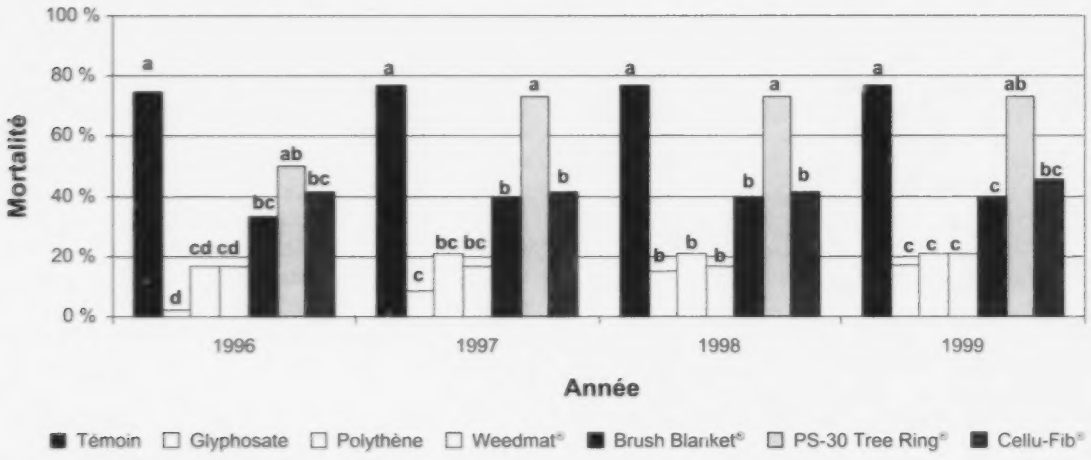


Figure 3b

Évolution de la mortalité du bouleau jaune entre 1996 et 1999. Les moyennes d'une même année identifiées par la même lettre ne sont pas différentes à $\alpha < 0,05$.

2.3 Analyses foliaires

2.3.1 Masse et surface foliaires et masse spécifique des feuilles

La masse foliaire du bouleau jaune et du frêne d'Amérique protégés contre la végétation concurrente est significativement supérieure à celle des parcelles témoins alors qu'une tendance semblable se dessine pour le chêne rouge ($p = 0,0540$) (Tableau 4 et Figure 4). Le paillis de polythène a favorisé l'accumulation des masses foliaires les plus élevées, significativement supérieures à celles observées avec le glyphosate, pour toutes les espèces, et à celles des autres paillis de plastique et des paillis de petites dimensions, pour le chêne rouge et le frêne d'Amérique seulement. La masse foliaire du frêne était significativement supérieure avec les paillis de plastique plutôt qu'organiques mais aucune espèce n'a obtenu de résultats différents lorsque les deux paillis organiques sont comparés.

Les divers traitements de protection contre la végétation concurrente ont entraîné de faibles variations de la surface foliaire pour l'ensemble des espèces. Seul le chêne rouge protégé par le paillis de polythène a obtenu une surface foliaire significativement supérieure à celle obtenue avec les paillis organiques et avec les paillis de petites dimensions.

La situation est toute autre avec la masse spécifique des feuilles où presque tous les contrastes pour l'ensemble des espèces ont eu des résultats significatifs. Ainsi, la masse foliaire spécifique des espèces ayant reçu un traitement de protection est significativement supérieure à celle des témoins (pour le chêne rouge, on note une tendance avec $p = 0,0568$). Les paillis de plastique sont supérieurs aux paillis organiques (pour le bouleau jaune, on note une tendance avec $p = 0,0635$). Le paillis de polythène, le traitement ayant permis la plus forte accumulation de masse spécifique des feuilles, est supérieur aux autres paillis de plastique (pour le bouleau jaune, on note une tendance avec $p = 0,0719$), aux paillis de plus petites dimensions et au glyphosate. Enfin, aucune différence significative n'a pu être décelée entre les deux paillis organiques pour aucune des espèces.

2.3.2 Masse spécifique des éléments majeurs dans les feuilles

À l'exception de Mg pour le chêne rouge, tous les traitements de protection contre la végétation concurrente sont associés à une masse spécifique des éléments majeurs supérieure à celle du témoin (Tableau 5 et Figure 5). Pour l'ensemble des espèces et des éléments nutritifs, à l'exception du bouleau jaune avec P, K et Mg, les paillis de plastique ont eu un effet significativement supérieur à celui des paillis organiques.

Comparé aux autres paillis faits de plastique, à ceux de plus petites dimensions et au glyphosate, le paillis de polythène a permis une accumulation supérieure de la masse spécifique de la majorité des éléments nutritifs pour l'ensemble des espèces (sauf Mg pour le bouleau jaune, le chêne rouge et l'érable à sucre). Aucune différence significative n'a cependant été notée entre les paillis organiques.

2.4 Paramètres morphologiques et dendrométriques

2.4.1 Hauteur

L'utilisation de la hauteur initiale des plants comme covariable dans les modèles statistiques n'apporte pas de contribution significative pour le bouleau jaune et l'érable à sucre alors que pour le frêne d'Amérique et le chêne rouge, celle-ci est significative. Le tableau 6 présente les résultats des tests effectués sur les effets fixes. Pour toutes les essences, l'analyse des mesures répétées de la hauteur indique qu'il existe des différences entre les traitements et qu'il n'y a pas de parallélisme des profils dans le temps ($F_{année*traitements} \geq 3,25$). Il faut donc procéder à l'étude des contrastes annuels pour vérifier comment se distinguent les traitements à chaque année. Il est à noter que pour l'érable à sucre l'estimation de la variance de l'effet aléatoire Bloc est nulle. Il est fort probable que son estimation donne un résultat négatif, ce qui est possible en théorie (Searle *et al.* 1992). La procédure MIXED fixe alors cette valeur à 0 en considérant que cet élément du modèle n'ajoute rien aux résultats.

La figure 6 illustre les différences de hauteur moyenne entre les contrastes, sur une base annuelle. Les symboles de grande taille indiquent que les différences sont significatives à $\alpha = 0,05$. Le contraste *traitements contre témoin* affiche des différences significatives à compter de 1994 pour l'érable à sucre, le frêne d'Amérique et le chêne rouge. Celles-ci comptent parmi les différences les plus grandes de tous les contrastes pour ces trois espèces. Pour le chêne rouge, l'écart entre les moyennes s'accentue avec le temps, pour atteindre un maximum de 120 cm, alors que pour l'érable à sucre et le frêne d'Amérique, il tend à se stabiliser à partir de 1997 autour de 130 et 65 cm respectivement. Pour le bouleau jaune, les différences deviennent significatives en 1995, l'écart entre les moyennes ayant dès lors tendance à se stabiliser entre 35 et 40 cm. La différence n'est cependant pas significative en 1998.

Tableau 4

Valeurs de p associées aux tests de t des contrastes orthogonaux sur la masse foliaire, la surface foliaire et la masse spécifique foliaire des quatre espèces feuillues, au cours de leur première saison de croissance (n = 28 par espèce). Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras

Contraste		Masse foliaire	Surface foliaire	Masse spécifique
Traitements contre témoin	Boj	**0,0003**	0,7529	**0,0001**
	Chr	0,0540	0,5086	0,0568
	Ers	0,1152	1,0000	**0,0443**
	Fra	**0,0004**	0,9405	**0,0003**
Paillis plastique contre paillis organique	Boj	0,0644	0,9920	0,0635
	Chr	0,2532	**0,0073**	**0,0005**
	Ers	0,2107	0,1058	**0,0003**
	Fra	**0,0075**	0,5737	**0,0009**
Polythène contre glyphosate	Boj	**0,0083**	1,0000	**0,0025**
	Chr	**0,0096**	0,8391	**0,0014**
	Ers	**0,0160**	0,6367	**0,0111**
	Fra	**0,0001**	0,6822	**< 0,0001**
Polythène contre autres plastiques	Boj	0,2330	0,8217	0,0719
	Chr	**0,0359**	0,2497	**0,0003**
	Ers	0,1080	0,9603	**0,0334**
	Fra	**0,0123**	0,2607	**< 0,0001**
Cellu-Fib® contre PS30 Tree Ring®	Boj	0,9983	0,5024	0,5424
	Chr	0,2309	0,5181	0,1158
	Ers	0,9308	0,5771	0,5280
	Fra	0,2120	0,1444	0,6018
Grand paillis contre petits paillis	Boj	0,0694	0,8338	**0,0200**
	Chr	**0,0200**	**0,0323**	**< 0,0001**
	Ers	0,0527	0,5244	**0,0010**
	Fra	**0,0014**	0,2120	**< 0,0001**

Le contraste *paillis de plastique contre paillis organique* affiche des différences significatives à compter de 1994 pour le bouleau jaune et l'érable à sucre et à partir de 1995 pour le chêne rouge et le frêne d'Amérique. Les paillis de plastique ont donné de meilleurs résultats de croissance en hauteur que les paillis organiques. L'écart entre les moyennes de hauteur s'accentue avec le temps pour atteindre 55 cm pour le bouleau jaune, 82 cm pour le chêne rouge, 115 cm pour l'érable à sucre et 90 cm pour le frêne d'Amérique.

Le contraste *paillis de polythène contre glyphosate* ne montre aucune différence significative pour le bouleau jaune et le frêne d'Amérique. On note une différence significative à partir de 1998 pour l'érable à sucre et seulement pour l'année 1999 pour le chêne rouge. Dans ces deux cas, les paillis de polythène ont donné de meilleurs résultats que le glyphosate mais les différences de hauteur sont inférieures à 35 cm. Il est intéressant de noter la tendance favorisant le traitement glyphosate jusqu'en 1996, année à compter de laquelle cette tendance a été renversée.

Le contraste *paillis de polythène contre autres paillis de plastique* présente des différences significatives à compter de 1994 pour le chêne rouge et de 1995 pour le bouleau jaune et l'érable à sucre. Le paillis de polythène donne les meilleurs résultats et les différences s'accroissent avec le temps pour le chêne rouge et le bouleau jaune, où elles atteignent 73 et 95 cm respectivement, alors qu'elles

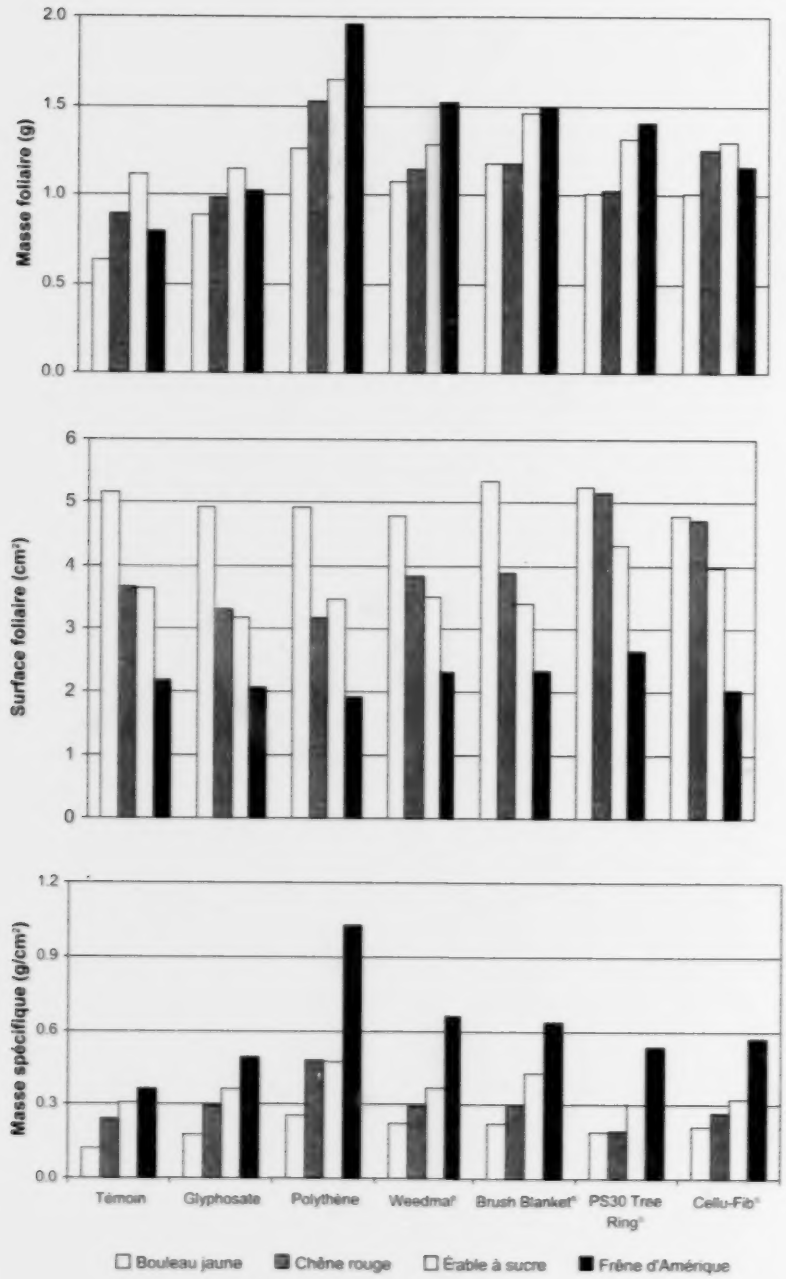


Figure 4

Masse foliaire moyenne, surface foliaire moyenne, masse foliaire spécifique moyenne au cours de la première saison de croissance en fonction des traitements de répression de la végétation concurrente (n = 36 par traitement et par espèce).

Tableau 5

Valeurs de p associées aux test de t des contrastes orthogonaux sur les masses spécifiques des éléments nutritifs foliaires des quatre espèces feuillues, au cours de leur première saison de croissance (n = 28 par espèce). Les effets significatifs sont indiqués en caractères gras

Contraste		Élément foliaire (valeurs de p)				
		N	P	K	Ca	Mg
Traitements contre témoin	Boj	**< 0,0001**	**0,0001**	**< 0,0001**	**< 0,0001**	**0,0467**
	Chr	**0,0087**	**0,0082**	**0,0140**	**0,0160**	0,3745
	Ers	**< 0,0001**	**< 0,0001**	**0,0024**	**0,0012**	**0,0139**
	Fra	**0,0002**	**0,0010**	**0,0002**	**0,0001**	**0,0030**
Paillis plastique contre paillis organique	Boj	**0,0005**	0,7553	0,0784	**0,0304**	0,7872
	Chr	**0,0009**	**0,0010**	**0,0002**	**0,0066**	**0,0278**
	Ers	**< 0,0001**	**< 0,0001**	**< 0,0001**	**0,0276**	**0,0006**
	Fra	**0,0004**	**0,0003**	**0,0050**	**0,0003**	**0,0052**
Polythène contre glyphosate	Boj	**< 0,0001**	0,7160	**0,0016**	**0,0063**	0,5300
	Chr	**0,006**	**0,0033**	**< 0,0001**	**0,0500**	0,5378
	Ers	**0,0069**	**0,0033**	**< 0,0001**	**0,5160**	0,1430
	Fra	**< 0,0001**	**0,0005**	**0,0004**	**< 0,0001**	**0,0001**
Polythène contre autres plastiques	Boj	**< 0,0001**	0,8111	**0,0201**	**0,0485**	0,2048
	Chr	**< 0,0001**	**0,0005**	**< 0,0001**	**0,0069**	0,2862
	Ers	**0,0301**	**0,0490**	**0,0005**	0,9688	0,7970
	Fra	**< 0,0001**	**0,0002**	**0,0003**	**0,0005**	**0,0049**
Cellu-Fib® contre PS30 Tree Ring®	Boj	0,7517	0,5744	0,8463	0,8507	0,4709
	Chr	0,2109	0,1475	0,1255	0,3776	0,2117
	Ers	0,6530	0,5993	0,9894	0,4019	0,7819
	Fra	0,6214	0,7427	0,9547	0,5776	0,6025
Grand paillis contre petits paillis	Boj	**< 0,0001**	0,9275	**0,0063**	**0,0097**	0,2057
	Chr	**< 0,0001**	**0,0001**	**0,0001**	**0,0008**	0,0585
	Ers	**0,0003**	**0,0002**	**< 0,0001**	0,3585	0,0679
	Fra	**< 0,0001**	**< 0,0001**	**< 0,0001**	**< 0,0001**	**0,0005**

se stabilisent autour de 55 cm à compter de 1996 pour l'érable à sucre. Pour le frêne d'Amérique, ce contraste ne montre pas de différences significatives.

Le contraste *entre les deux paillis organiques* n'affiche aucune différence significative pour le frêne d'Amérique et le chêne rouge. Des différences significatives ponctuelles sont obtenues pour le bouleau jaune en 1999, où le paillis PS-30 Tree Ring® a donné de meilleurs résultats, ainsi que pour l'érable à sucre en 1997, où le paillis Cellu-Fib® a donné des hauteurs moyennes supérieures. Le contraste entre le *grand paillis de polythène et les petits paillis* présente des différences significatives à compter de 1994 pour le bouleau jaune, l'érable à sucre et le chêne rouge, pour lesquels l'écart entre les moyennes s'accentue avec le temps. Elles atteignent 106, 104 et 102 cm, respectivement. Pour le frêne d'Amérique, les différences deviennent significatives à partir de 1995, en faveur du grand paillis, et atteignent un maximum de 62 cm en 1997 pour se stabiliser par la suite.

2.4.2 Longueur de la pousse annuelle

L'utilisation de la hauteur initiale des plants comme covariable dans les modèles statistiques de la longueur de la pousse annuelle n'apporte pas de contribution significative. Le tableau 6 présente les résultats des tests effectués sur les effets fixes et la figure 7 présente l'évolution des différences des moyennes de longueur de la pousse annuelle entre les contrastes. Pour toutes les essences, l'analyse des

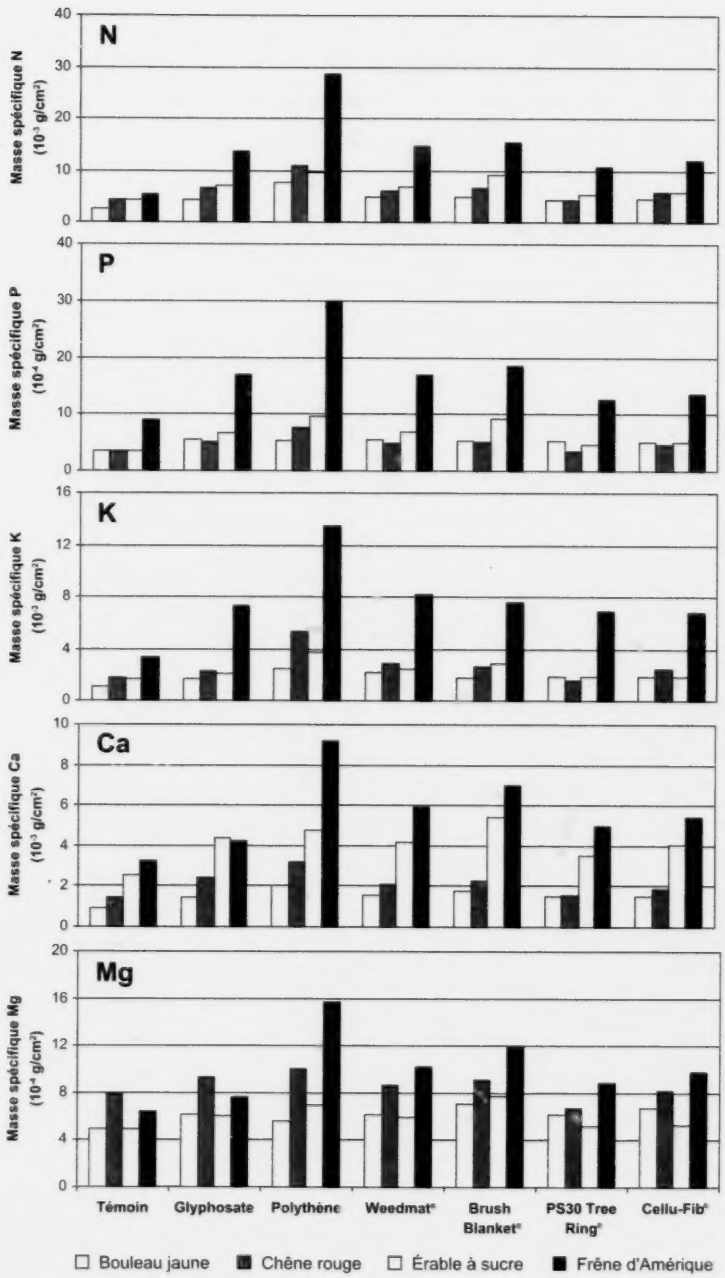


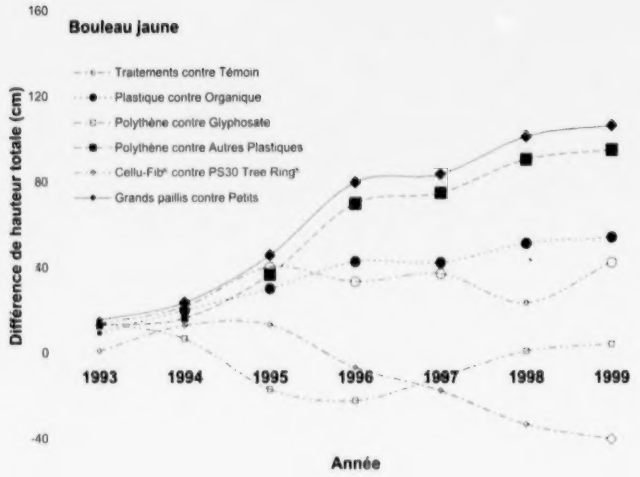
Figure 5

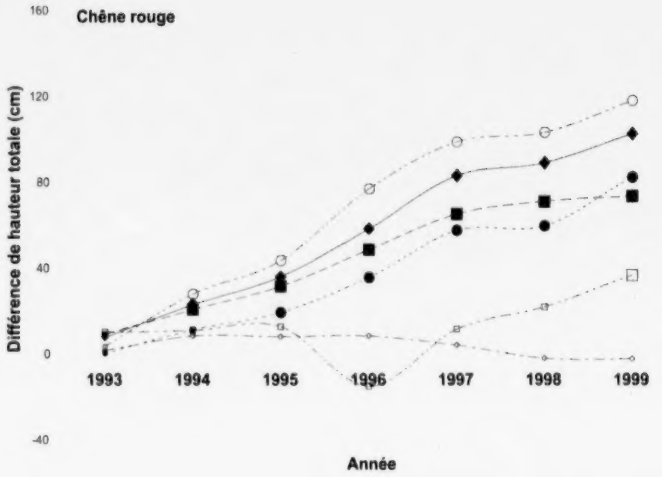
Masse spécifique des éléments foliaires majeurs au cours de la première saison de croissance en fonction des traitements de répression de la végétation concurrente (n = 28 par espèce).

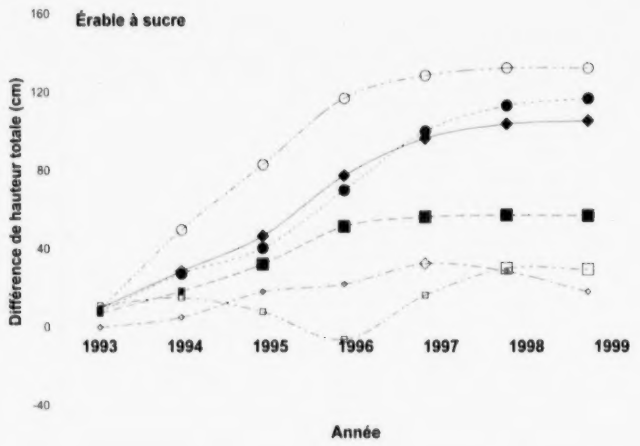
Tableau 6

Tableau d'analyse de variance des mesures répétées sur la hauteur totale, la longueur de la pousse annuelle, la hauteur cumulative, le diamètre et la surface terrière pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique

Effets fixes	Bouleau jaune		Chêne rouge		Érable à sucre		Frêne d'Amérique	
	F	p	F	p	F	p	F	p
Hauteur totale								
Traitement	15,76	< 0,0001	31,05	< 0,0001	33,91	< 0,0001	8,36	< 0,0001
Année	797,02	< 0,0001	1 778,11	< 0,0001	1 615,12	< 0,0001	1 174,52	< 0,0001
Année*Traitement	6,71	< 0,0001	11,81	< 0,0001	15,03	< 0,0001	3,25	< 0,0001
Hauteur initiale			18,01	< 0,0001			17,85	< 0,0001
Longueur de la pousse annuelle								
Traitement	16,22	< 0,0001	26,82	< 0,0001	23,44	< 0,0001	6,67	0,0007
Année	58,24	< 0,0001	330,69	< 0,0001	147,17	< 0,0001	162,38	< 0,0001
Année*Traitement	3,54	< 0,0001	4,53	< 0,0001	4,41	< 0,0001	2,47	0,0001
Hauteur cumulative								
Traitement	3,41	0,0214	17,94	< 0,0001	24,83	< 0,0001	2,07	0,1095
Année	29,25	< 0,0001	835,39	< 0,0001	547,10	< 0,0001	493,03	< 0,0001
Année*Traitement	2,85	< 0,0001	9,19	< 0,0001	10,31	< 0,0001	2,13	0,0012
Diamètre								
Traitement	29,84	< 0,0001	33,26	< 0,0001	33,56	< 0,0001	8,22	0,0002
Année	134,15	< 0,0001	648,30	< 0,0001	431,53	< 0,0001	278,08	< 0,0001
Année*Traitement	4,91	< 0,0001	9,86	< 0,0001	11,65	< 0,0001	2,56	0,0001
Diamètre initial	12,99	0,0004	90,34	< 0,0001	89,37	< 0,0001	45,02	< 0,0001
Surface terrière								
Traitement	20,75	< 0,0001	23,83	< 0,0001	18,98	< 0,0001	3,40	0,0215
Année	51,24	< 0,0001	397,78	< 0,0001	190,52	< 0,0001	110,18	< 0,0001
Année*Traitement	6,05	< 0,0001	12,08	< 0,0001	8,12	< 0,0001	2,28	0,0006







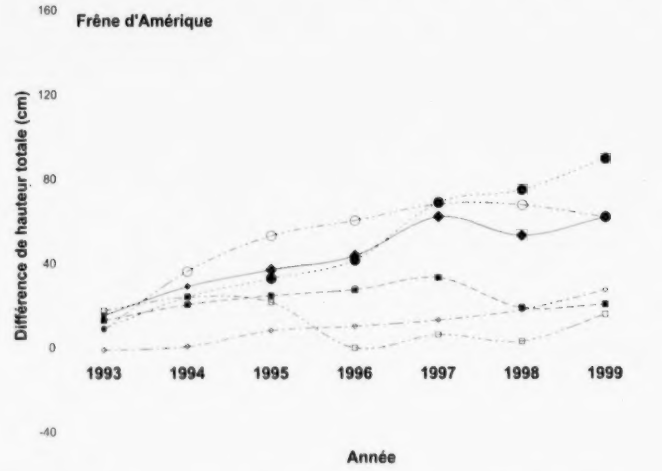


Figure 6

Évolution des différences de hauteur moyenne entre les contrastes (les symboles de grande taille signifient que les différences de hauteur entre les contrastes sont significatives).

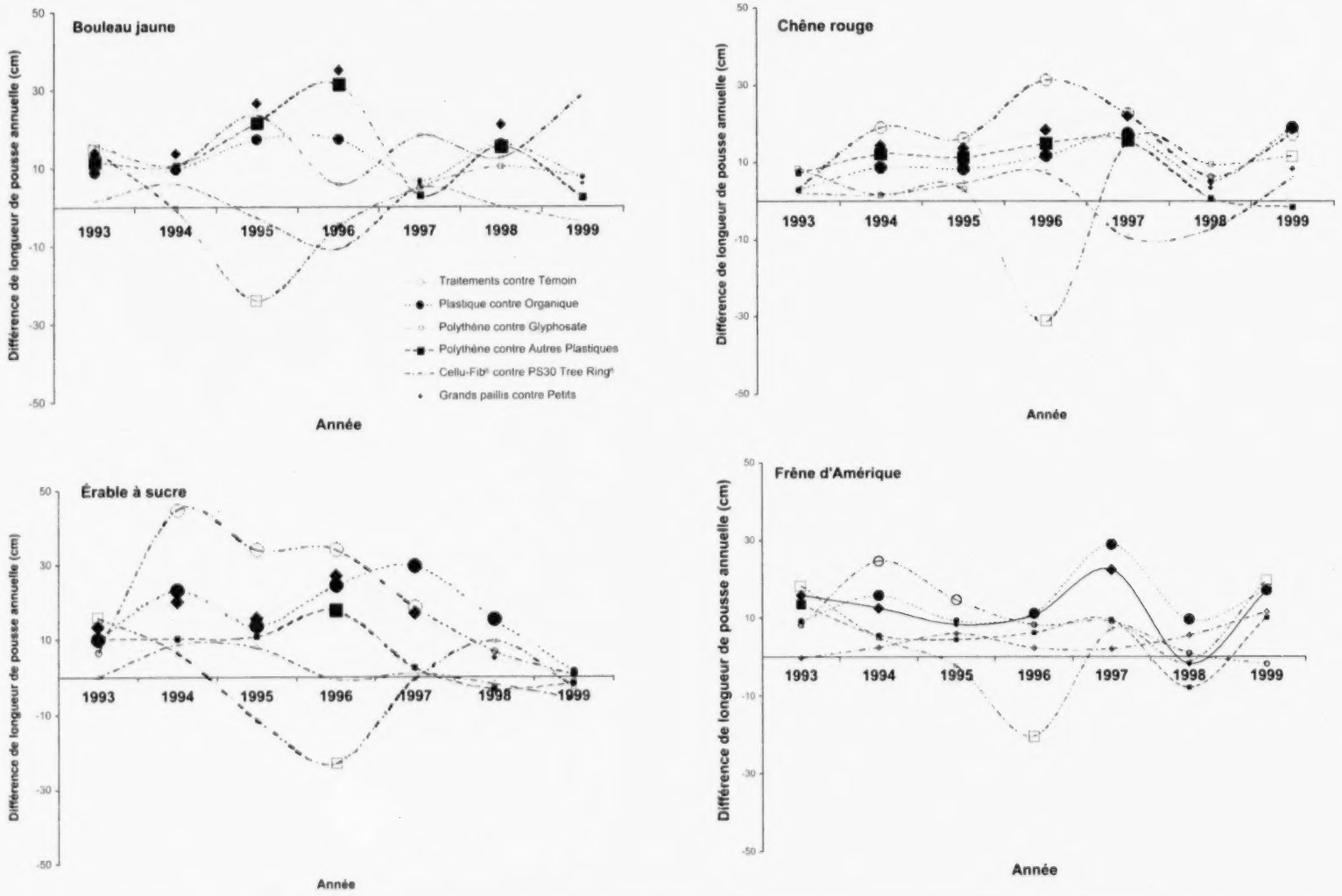


Figure 7

Évolution des différences de longueur de la pousse annuelle moyenne entre les contrastes
(les symboles de grande taille signifient que les différences de diamètre entre les contrastes sont significatives).

mesures répétées indique qu'il existe des différences entre les traitements et qu'il n'y a pas de parallélisme des profils dans le temps ($F_{année*traitements} \geq 2,47$). Il faut donc procéder à l'étude des contrastes annuels pour vérifier comment se distinguent les traitements à chaque année. Il est à noter que pour l'érable à sucre l'estimation de la variance de l'effet aléatoire Bloc est nulle, comme cela s'est également produit avec l'analyse de la hauteur.

Le contraste entre les *traitements et le témoin* montre, pour l'ensemble des espèces, des résultats significatifs en 1994 et 1995, la pousse annuelle étant plus longue pour les traitements de répression de la végétation concurrente que pour le témoin. Pour le bouleau jaune, on obtient en plus des résultats significatifs en 1993 et 1999 et les écarts de longueur de pousse annuelle varient entre 6 et 28 cm, selon les années. Pour le chêne rouge, les écarts sont significatifs aussi en 1996, où les différences maximales sont survenues (31 cm), puis en 1997 et en 1999. Pour l'érable à sucre, c'est en 1994 que l'écart de longueur de la pousse annuelle entre les contrastes était le plus important, avec 45 cm, puis il diminue progressivement par la suite pour devenir non significatif à compter de 1998. Quant au frêne d'Amérique, l'écart maximal de 25 cm est également survenu en 1994 pour diminuer progressivement à près de 0 cm en 1999 et devenir non significatif à compter de 1996.

Le contraste *paillis de plastique contre paillis organique* montre que les paillis de plastique produisent pour le bouleau jaune des pousses annuelles plus longues, les différences étant significatives et progressives entre 1993 et 1996, l'écart maximal atteignant 17 cm. Les différences redeviennent significatives en 1998, à la faveur des paillis de plastique. Pour le chêne rouge, les différences sont significatives entre 1994 et 1997, puis en 1999 où elles atteignaient 19 cm ; les écarts ayant tendance à s'accroître dans le temps. Pour l'érable à sucre, les écarts sont significatifs entre 1993 et 1998, l'écart maximal étant observé en 1997 avec 30 cm, pour devenir presque nul en 1999. Pour le frêne d'Amérique, les différences de longueur de la pousse annuelle entre les contrastes sont significatives en 1994 puis entre 1996 et 1998, la valeur maximale ayant été obtenue en 1997 avec 29 cm.

Pour le bouleau jaune, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique, le paillis de polythène a favorisé le développement de pousses annuelles significativement plus longues qu'avec le glyphosate dès la première saison de croissance (1993). Toutefois, en 1995 pour le bouleau jaune et en 1996 pour les trois autres espèces, on observait le contraire, les pousses annuelles étant significativement plus longues avec le glyphosate qu'avec le paillis de polythène. Il s'agissait d'ailleurs des écarts maximaux observés entre les effets des deux traitements (31, 23 et 20 cm pour le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique respectivement). Pour le bouleau jaune et l'érable à sucre, aucune autre différence significative n'est survenue alors qu'en 1999 pour le frêne d'Amérique et en 1997 et en 1999 pour le chêne rouge, la pousse annuelle était significativement plus longue avec le paillis de polythène.

Le paillis de polythène a aussi donné des résultats significativement supérieurs aux autres paillis de plastique pour le bouleau jaune entre 1993 et 1996, puis en 1998, l'écart le plus important s'étant produit en 1996 avec 31 cm. Pour le chêne rouge, on observe des écarts significatifs entre les contrastes qui s'accroissent entre 1994 et 1997 (16 cm en 1997) pour devenir presque nuls en 1998 et 1999. Pour l'érable à sucre, la seule différence significative est survenue en 1996, avec un écart de 18 cm alors que pour le frêne d'Amérique, la seule différence significative s'est produite en 1993.

Aucune différence significative entre les effets du paillis Cellu-Fib® et du paillis PS-30 Tree Ring® sur la longueur de la pousse annuelle n'a été relevée avec les quatre espèces. Cependant, le grand paillis de polythène a donné des résultats significativement supérieurs aux petits paillis pour le bouleau jaune et l'érable à sucre entre 1993 et 1996, pour le chêne rouge entre 1994 et 1997, puis pour le frêne d'Amérique en 1993, 1994, 1997 et 1999. Les écarts les plus importants ont été notés en 1996 pour le bouleau jaune et l'érable à sucre (35 et 27 cm respectivement) et en 1997 pour le chêne rouge et le frêne d'Amérique (22 cm pour les deux espèces).

2.4.3 Hauteur cumulative

Le tableau 6 présente les résultats des tests sur les effets fixes de l'analyse des mesures répétées sur la hauteur cumulative et la figure 8 illustre l'évolution des différences des moyennes de hauteur cumulative entre les contrastes. Aucune covariable n'est significative dans les modèles d'analyse. Aussi, l'estimation de la variance de l'effet aléatoire Bloc*Traitement est égale à 0 pour toutes les espèces. La contribution de cet élément au modèle n'ajoute donc rien aux résultats, comme ce fut le cas dans l'étude de la hauteur et de la longueur de la pousse annuelle pour l'érable à sucre. Par ailleurs, l'effet Bloc*Traitement*Année est absent du modèle car les mesures répétées de la hauteur cumulative portent sur les parcelles entières plutôt que sur les individus qui les composent. L'analyse des mesures répétées

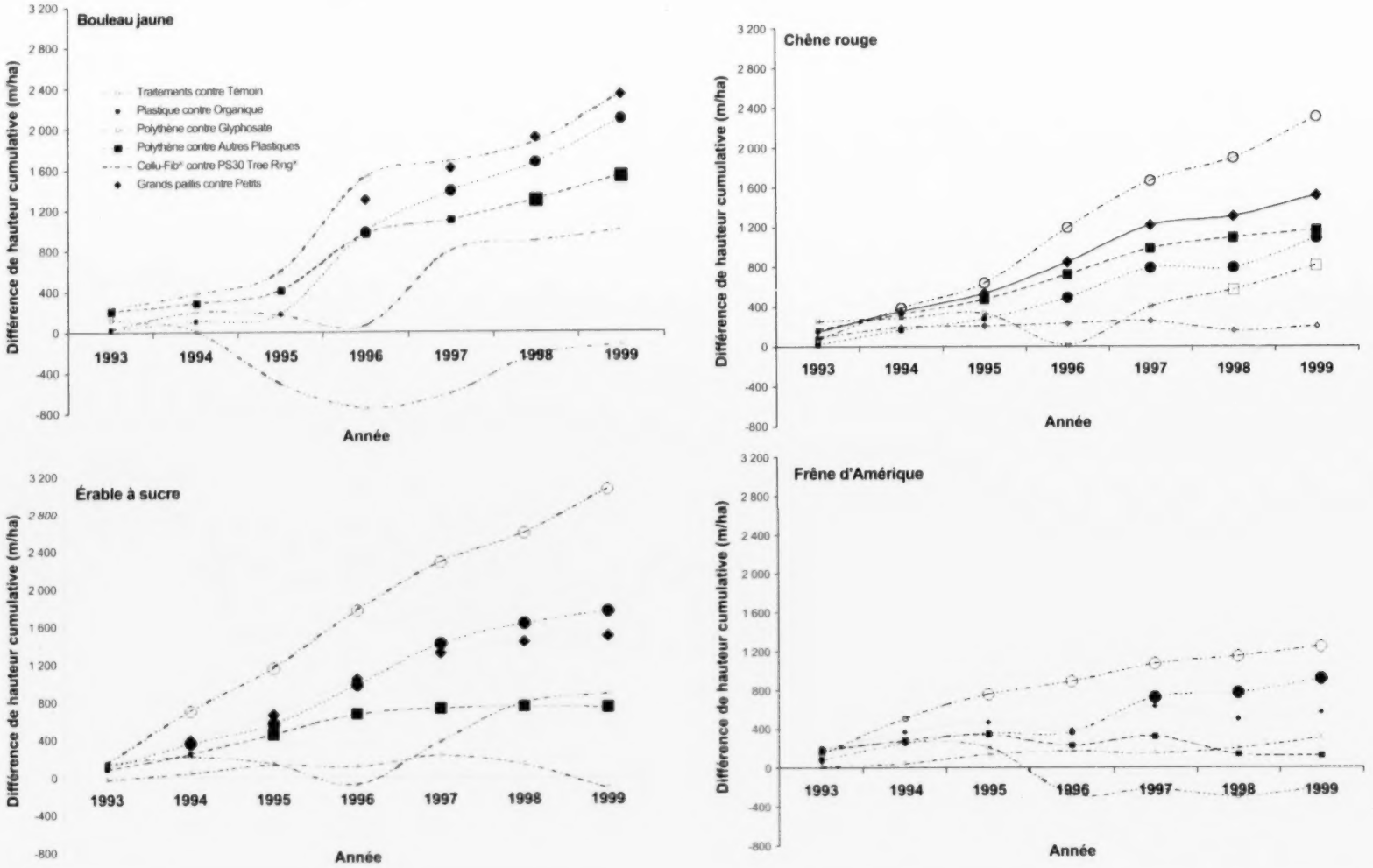


Figure 8

Évolution des différences de hauteur cumulative moyenne entre les contrastes (les symboles de grande taille signifient que les différences de hauteur cumulative entre les contrastes sont significatives).

de la hauteur cumulative indique qu'il y a des différences entre les traitements mais qu'il n'y a pas de parallélisme des profils dans le temps pour les quatre espèces à l'étude ($F_{année*traitements} \geq 2,13$). Il faut donc calculer les contrastes pour chaque année de manière à déterminer comment se distinguent les traitements dans le temps.

Le contraste *traitements contre témoin* montre qu'il y a une différence significative à partir de 1994 pour l'érable à sucre et le chêne rouge, à partir de 1995 pour le frêne d'Amérique et à partir de 1996 pour le bouleau jaune. Les traitements de répression de la végétation concurrente donnent des hauteurs cumulatives supérieures au témoin et les écarts, qui s'accentuent avec le temps, sont les plus importants de tous les contrastes pour les quatre espèces. Ils atteignent 2 330, 2 310, 3 050 et 1 250 m/ha pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique, respectivement.

Le contraste des *paillis de plastique contre paillis organiques* indique qu'il y a une différence significative à partir de 1994 pour l'érable à sucre, à partir de 1996 pour le bouleau jaune et le chêne rouge et à partir de 1997 pour le frêne d'Amérique. Dans tous les cas, les paillis de plastique donnent de meilleurs résultats de hauteur cumulative que les paillis organiques et l'écart augmente avec les années pour atteindre 2 100, 1 090, 1 760 et 920 m/ha pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique, respectivement.

Le contraste entre le *paillis de polythène et le glyphosate* n'affiche aucune différence significative pour le bouleau jaune, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique, les écarts demeurant sous la barre des 900 m/ha. Pour le chêne rouge par contre, le paillis de polythène est associé à une hauteur cumulative supérieure à celle obtenue avec le glyphosate en 1998 et 1999 et l'écart va en s'accentuant pour atteindre 820 m/ha. La même tendance favorable au traitement herbicide, observée lors de l'analyse de la hauteur, s'exprime également pour la hauteur cumulative en 1996 pour les quatre espèces.

Le contraste entre le *paillis de polythène et les autres paillis de plastique* affiche une différence significative à partir de 1995 pour l'érable à sucre et le chêne rouge et de 1998 pour le bouleau jaune. Le paillis de polythène donne de meilleurs résultats que les autres paillis de plastique et l'écart augmente avec les années pour le bouleau jaune avec un maximum de 1 540 m/ha à sept ans. Pour le chêne rouge et l'érable à sucre, les écarts se stabilisent autour de 1 140 m/ha à partir de 1997 et de 780 m/ha à partir de 1996, respectivement. Pour le frêne d'Amérique, aucune différence significative n'a été obtenue.

Le contraste entre les *deux paillis organiques* n'affiche aucune différence significative pour les quatre espèces plantées. Cependant, le contraste entre le *grand paillis et les petits paillis* affiche des différences significatives à partir de 1994 pour l'érable à sucre, de 1995 pour le chêne rouge et de 1996 pour le bouleau jaune. Le grand paillis donne des résultats de hauteur cumulative supérieurs aux petits paillis et l'écart augmente avec les années pour atteindre 2 330, 1 520 et 1 490 m/ha pour le bouleau jaune, le chêne rouge et l'érable à sucre, respectivement. Pour le frêne d'Amérique, on note aucune différence significative.

2.4.4 Diamètre

Une particularité concernant l'analyse de l'évolution du diamètre des tiges est qu'à partir de 1997, on a commencé à mesurer le dhp plutôt que le dhs, ce dernier étant mesuré seulement lorsqu'il n'y avait pas de dhp. Cette façon de faire s'est répétée en 1998. En 1999, tous les arbres mesurés avaient atteint la hauteur requise pour mesurer le dhp. Comme le diamètre est analysé selon un plan à mesures répétées, ce changement de niveau de la mesure du diamètre aurait pu causer un problème. Cependant, le nombre de sujets dont le dhp n'a pu être mesuré en 1997 est très faible par rapport au total. Ainsi, on peut analyser en mesures répétées le dhs de 1993 à 1996, puis le dhp de 1997 à 1999, puisque la corrélation entre le dhp et le dhs est très forte. La structure d'autocorrélation des diamètres d'une année à l'autre n'est donc pas affectée. Aussi, on ne compare pas les accroissements en diamètre d'une année à l'autre, mais bien les effets des traitements (par contrastes) à chaque année.

Le tableau 6 présente les résultats des tests sur les effets fixes de l'analyse des mesures répétées effectuée sur le diamètre des arbres et la figure 9 illustre l'évolution des différences des moyennes de diamètre entre les contrastes. L'analyse indique que la contribution du diamètre initial dans les modèles statistiques est significative pour les quatre espèces. L'analyse des mesures répétées montre qu'il y a des différences de l'évolution du diamètre entre les traitements pour toutes les espèces mais qu'il n'y a pas de parallélisme des profils dans le temps ($F_{année*traitement} \geq 2,56$). On doit donc calculer les contrastes à chaque année pour vérifier comment se distinguent les traitements dans le temps.

Le contraste entre *les traitements et le témoin* indique que les différences deviennent significatives à partir de 1994 pour les quatre espèces. Pour le chêne rouge et l'érable à

sucre, l'écart s'accroît avec les années pour atteindre une valeur de 18 et 19 mm après sept saisons de croissance. Pour le frêne d'Amérique, l'écart est devenu pratiquement constant à compter de 1996, variant entre 10 et 11 mm. Pour ces trois espèces, les écarts de diamètre moyen figurent parmi les plus importants de tous les contrastes. Cependant, pour le bouleau jaune, l'écart du diamètre moyen en 1998 a diminué au point que le résultat n'est plus significatif. En fait, pour les témoins en 1997 et 1998, seulement onze bouleaux jaunes atteignaient le dhp, ceux-ci étant tous localisés dans le bloc 4, épargné plus que les autres des ravages causés par le *Phomopsis*. Ce cas excepté, on peut noter que l'écart entre le témoin et les autres traitements s'est accru en 1999 jusqu'à une valeur de 14 mm.

Le contraste entre les *paillis de plastique et les paillis organiques* montre que l'écart devient significatif à partir de 1994 pour le bouleau jaune, le chêne rouge et le frêne d'Amérique et à compter de 1995 pour l'érable à sucre. Les paillis de plastique donnent de meilleurs résultats que les paillis organiques et l'écart augmente avec les années pour atteindre 13, 12, 14 et 15 mm pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique respectivement.

Le contraste entre le *paillis de polythène et le glyphosate* n'affiche aucune différence significative pour toutes les espèces. Les écarts de diamètre moyen sont toujours demeurés inférieurs à 5 mm. Cependant, comme il a été observé pour les différences de hauteur totale et de hauteur cumulative, une certaine tendance favorisant le traitement herbicide semblait s'exprimer jusqu'en 1996 pour le bouleau jaune et en 1997 pour le frêne d'Amérique.

Le contraste entre le *paillis de polythène et les autres paillis de plastique* indique que le premier donne des résultats significativement supérieurs aux seconds à partir de 1994 pour le bouleau jaune et de 1995 pour les trois autres espèces. Pour le bouleau jaune et le chêne rouge, l'écart entre les diamètres s'accroît avec les années, pour atteindre 18 et 13 mm respectivement. Pour l'érable à sucre, l'écart augmente jusqu'en 1996 pour se stabiliser par la suite autour de 6 mm. Pour le frêne d'Amérique, les écarts de diamètre moyen augmentent jusqu'en 1996 (8 mm), puis diminuent et se stabilisent autour de 4 mm à partir de 1997, où ils ne sont plus significatifs.

Le contraste entre les deux traitements de paillis organiques ne montre pas de différence significative pour aucune des espèces plantées ; les écarts de diamètre moyen demeurant inférieurs à 3 mm. Il en est tout autrement pour le contraste entre le *paillis de grandes dimensions et les petits paillis* qui affiche une différence significative en faveur du grand paillis à partir de 1994 pour toutes les espèces. Les écarts de diamètre moyen comptent parmi les plus élevés pour les quatre espèces avec 21, 17, 12 et 11 mm pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique respectivement.

2.4.5 Surface terrière

Le calcul de la surface terrière a été effectué au niveau du dhs entre 1993 et 1996 et au niveau du dhp à partir de 1997. Comme dans le cas de l'analyse du diamètre, la structure d'autocorrélation de la surface terrière d'une année à l'autre n'est pas affectée par le changement du niveau de la mesure du diamètre. Aussi, la comparaison ne porte pas sur l'accroissement en surface terrière des espèces d'une année à l'autre mais bien sur les traitements à chaque année.

Le tableau 6 affiche les résultats des tests sur les effets fixes de l'analyse des mesures répétées sur la surface terrière et la figure 10 montre l'évolution des différences des moyennes de surface terrière entre les contrastes. L'analyse indique que la contribution du diamètre initial dans les modèles statistiques n'est pas significative pour les quatre espèces. Il est à noter, comme pour la hauteur cumulative, que l'effet Bloc*Traitement*Année est absent du modèle car les mesures répétées de la surface terrière portent sur les parcelles entières plutôt que sur les individus qui les composent. L'analyse des mesures répétées révèle, pour toutes les espèces, qu'il y a des différences dans l'évolution de la surface terrière entre les traitements mais qu'il n'y a pas de parallélisme des profils dans le temps ($F_{annee*traitement} \geq 2{,}28$). Il faut donc calculer les contrastes à chaque année pour vérifier comment se distinguent les traitements dans le temps.

À compter de 1995 pour le bouleau jaune, le chêne rouge et l'érable à sucre et de 1996 pour le frêne d'Amérique, la surface terrière des parcelles ayant reçu un traitement de répression est significativement supérieure à celle des parcelles témoins. En 1997 seulement, l'année où a débuté la mesure du diamètre à hauteur de poitrine, les différences ne sont pas significatives pour le bouleau jaune et le frêne d'Amérique. L'écart entre les parcelles traitées et les parcelles témoins a tendance à s'accroître dans le temps. Les différences maximales ont été enregistrées en 1999 avec 0,76 m^2/ha pour le bouleau jaune, 1,13 m^2/ha pour l'érable à sucre et le frêne d'Amérique et 1,46 m^2/ha pour le chêne rouge.

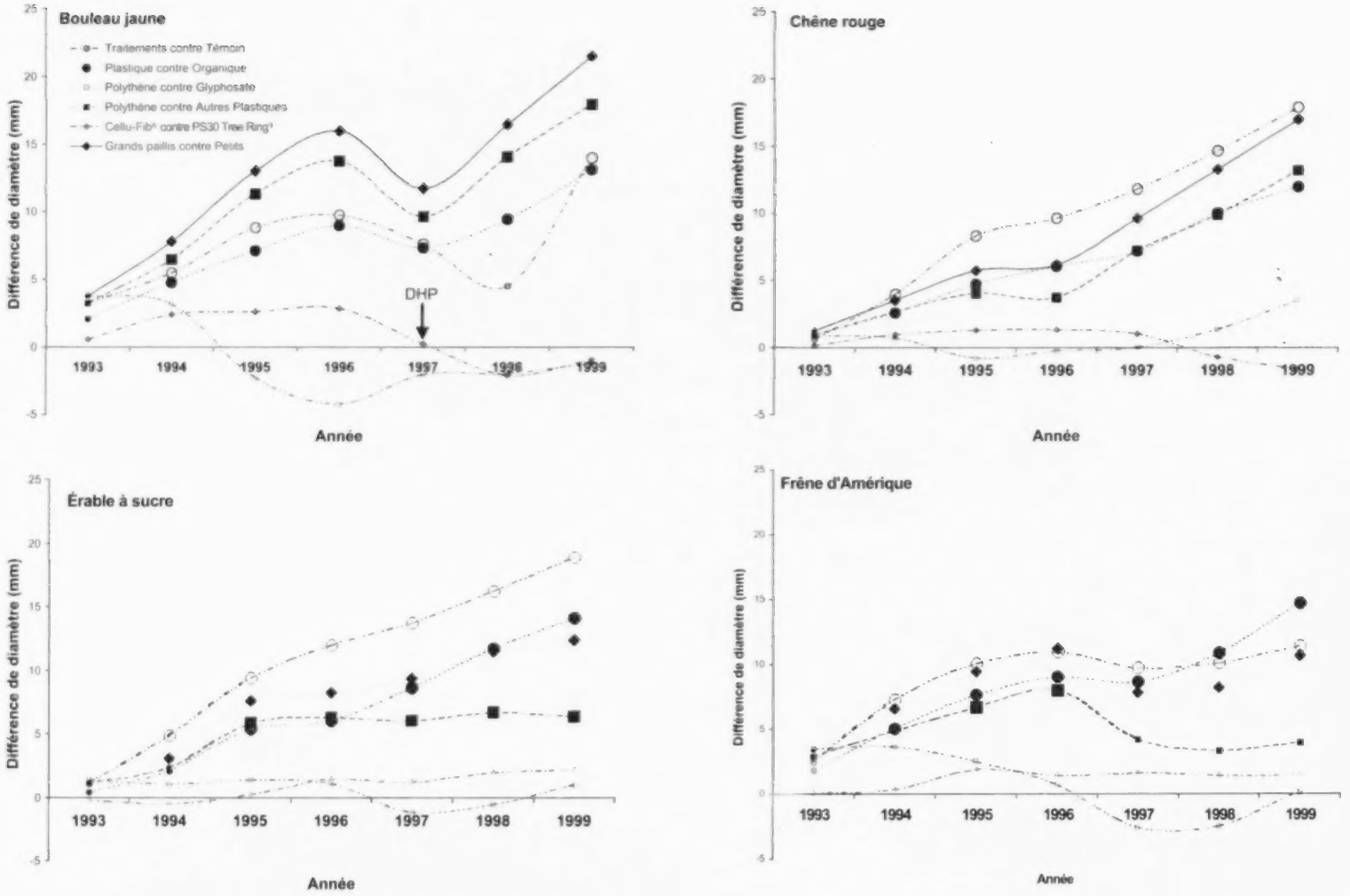


Figure 9

Évolution des différences de diamètre moyen entre les contrastes (les symboles de grande taille signifient que les différences de diamètre entre les contrastes sont significatives).

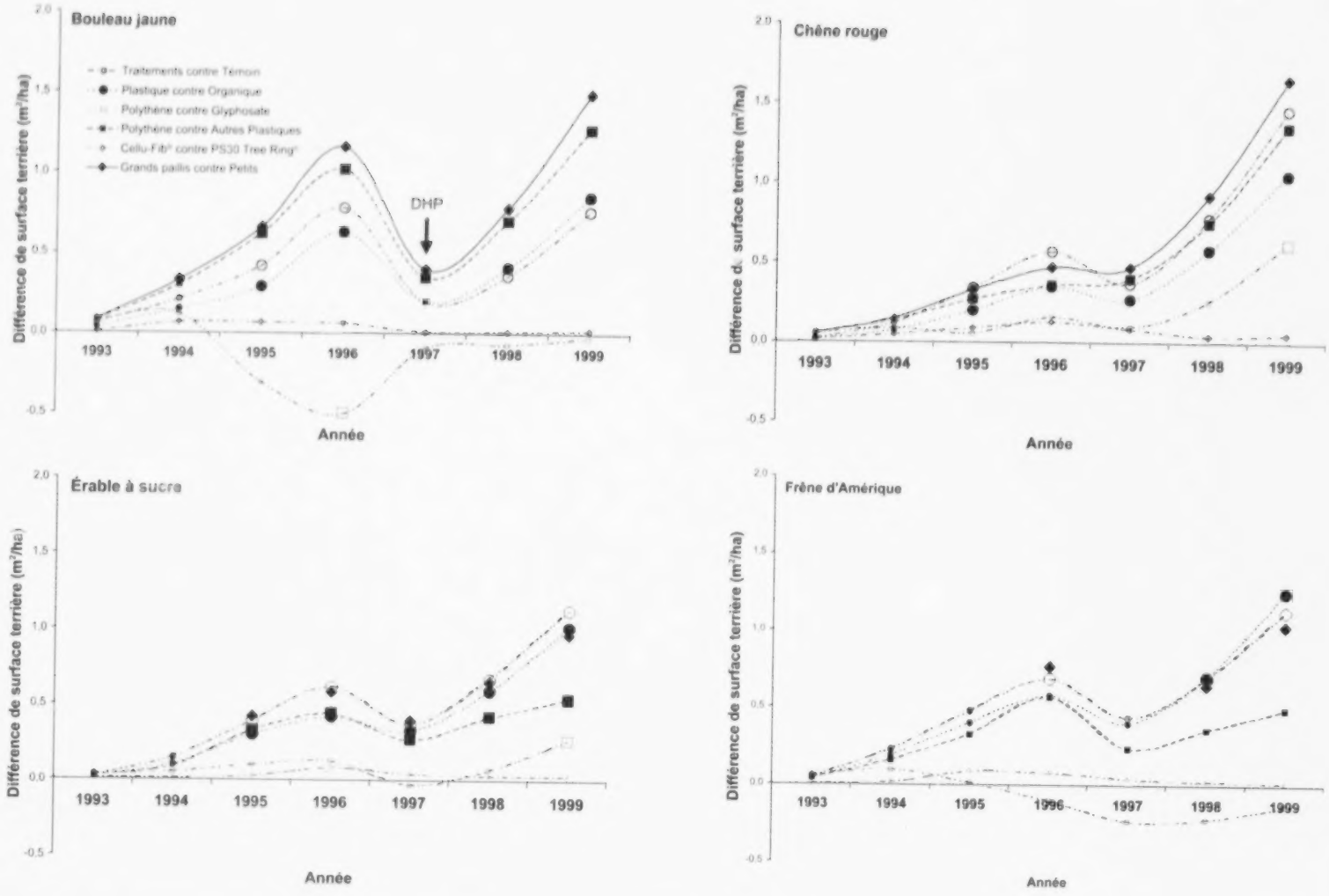


Figure 10

Évolution des différences de surface terrière moyenne entre les contrastes (les symboles de grande taille signifient que les différences de hauteur cumulative entre les contrastes sont significatives).

Pour le bouleau jaune, le chêne rouge et l'érable à sucre, la surface terrière des parcelles protégées par des paillis de plastique est significativement supérieure à celle des parcelles avec paillis organiques à compter de 1995. En 1997, il n'y a pas de différence significative entre les traitements pour le bouleau jaune. Pour le frêne d'Amérique, la surface terrière des parcelles avec paillis de plastique est significativement supérieure à celle des parcelles avec paillis organique en 1998 et 1999. Dans tous les cas, l'écart entre les moyennes des contrastes tend à augmenter avec le temps. L'écart maximal est survenu en 1999 pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique avec 0,85, 1,05, 1,01 et 1,25 m^2/ha respectivement.

En ce qui a trait au contraste *paillis de polythène contre glyphosate*, seules quelques différences significatives ponctuelles, sans tendance particulière, ont été relevées. Pour le bouleau jaune, la surface terrière des parcelles traitées au glyphosate est significativement supérieure à celle ayant reçu un paillis de plastique en 1996 seulement, l'écart étant de 0,5 m^2/ha. Pour le chêne rouge et l'érable à sucre, seule l'année 1999 affiche une surface terrière significativement plus grande pour les parcelles protégées par le paillis de plastique, avec 0,62 et 0,27 m^2/ha respectivement alors que pour le frêne d'Amérique, il n'y a aucune différence significative entre les deux traitements.

Le paillis de polythène a permis au bouleau jaune, au chêne rouge et à l'érable à sucre d'atteindre une surface terrière significativement supérieure à celle des parcelles protégées par les autres paillis de plastique à compter de 1995. La tendance observée est celle d'une augmentation des écarts avec les années, à l'exception de 1997, année où a débuté la mesure du dhp. Les écarts maximaux sont survenus en 1999 avec 1,27, 1,35 et 0,54 m^2/ha respectivement. Pour le frêne d'Amérique, aucune différence significative n'a été observée.

Pour les quatre espèces, les *deux paillis organiques* ne se distinguent pas l'un de l'autre par leurs effets sur la surface terrière. Cependant, le paillis de polythène a favorisé l'accroissement d'une surface terrière significativement plus grande que les paillis de petites dimensions pour toutes les espèces, à compter de 1994 pour le bouleau jaune, de 1995 pour le chêne rouge et l'érable à sucre et de 1996 pour le frêne d'Amérique. En 1997 pour le frêne d'Amérique, les différences ne sont pas cependant significatives. Les différences ont tendance à s'accroître avec le temps pour toutes les espèces, sauf l'année de la transition de la mesure au dhp, en 1997. Les différences maximales ont été observées en 1999 avec 1,49, 1,65, 0,96 et 1,03 m^2/ha pour le bouleau jaune, le chêne rouge, l'érable à sucre et le frêne d'Amérique respectivement.

2.4.6 Proportion de tiges de 5 cm et plus de dhp en 1999

La figure 11 illustre la proportion des semis plantés en 1993 qui ont atteint un dhp de 5 cm et plus en 1999 pour chaque essence et chaque traitement. La comparaison des effets des traitements a été effectuée selon l'analyse des intervalles de confiance sur les moyennes pour chacune des espèces.

Pour le bouleau jaune, à peine 12 % des tiges plantées à l'origine ont atteint 5 cm et plus au dhp en 1999, tous traitements confondus. Les forts taux de mortalité observés dans certains des traitements influencent cette valeur. Toutefois, des différences importantes existent entre les traitements. L'analyse indique que la proportion est plus élevée avec le traitement glyphosate et le paillis de polythène qu'avec les autres traitements. Les proportions dans ces deux traitements sont respectivement de 38 et 35 % en comparaison de 2 % et moins pour les autres traitements.

Pour le chêne rouge, 28 % des semis d'origine ont atteint 5 cm au dhp en 1999. La faible mortalité du chêne et la vitesse de croissance juvénile de cette espèce ont favorisé l'atteinte de cette proportion. L'analyse des intervalles de confiance identifie toutefois trois groupes de traitements selon leurs effets sur cette proportion. Le paillis de polythène et le glyphosate (81 et 53 %) forment le premier groupe. Viennent ensuite le paillis Weedmat® (29 %) puis les autres traitements (8 % et moins).

Pour l'érable à sucre, comme cela fut le cas pour le bouleau jaune, la mortalité a réduit la possibilité de plusieurs individus d'atteindre un dhp de 5 cm et plus. Pour cette essence, il y a deux groupes de traitements selon leurs effets sur la proportion de tiges de 5 cm et plus. Il s'agit du traitement glyphosate et du paillis de polythène (23 et 25 % respectivement) pour le premier et des autres traitements à 6 % et moins pour le second.

Le frêne d'Amérique est celle des quatre espèces plantées à Beaumont qui a atteint la plus forte proportion de tiges de 5 cm et plus au dhp après sept saisons de croissance,

avec 36 % des individus d'origine. La croissance vigoureuse du frêne et son fort taux de survie lui ont permis d'atteindre une proportion aussi élevée. Il y a aussi pour le frêne deux groupes de traitements. Le glyphosate, le paillis de polythène, le paillis Brush Blanket® et le paillis Weedmat® (69, 58, 42 et 52 % respectivement) forment le premier groupe et les autres traitements à 10 % et moins forment le second.

La moitié des semis qui ont reçu la protection d'un paillis de polythène ou du glyphosate ont atteint 5 cm et plus au dhp (50 et 46 % respectivement) après seulement sept saisons de croissance, toutes espèces confondues. Les paillis Weedmat® (22 %) et Brush Blanket® (15 %) viennent ensuite puis les paillis organiques et le témoin ferment la marche avec une proportion de 7 % et moins.

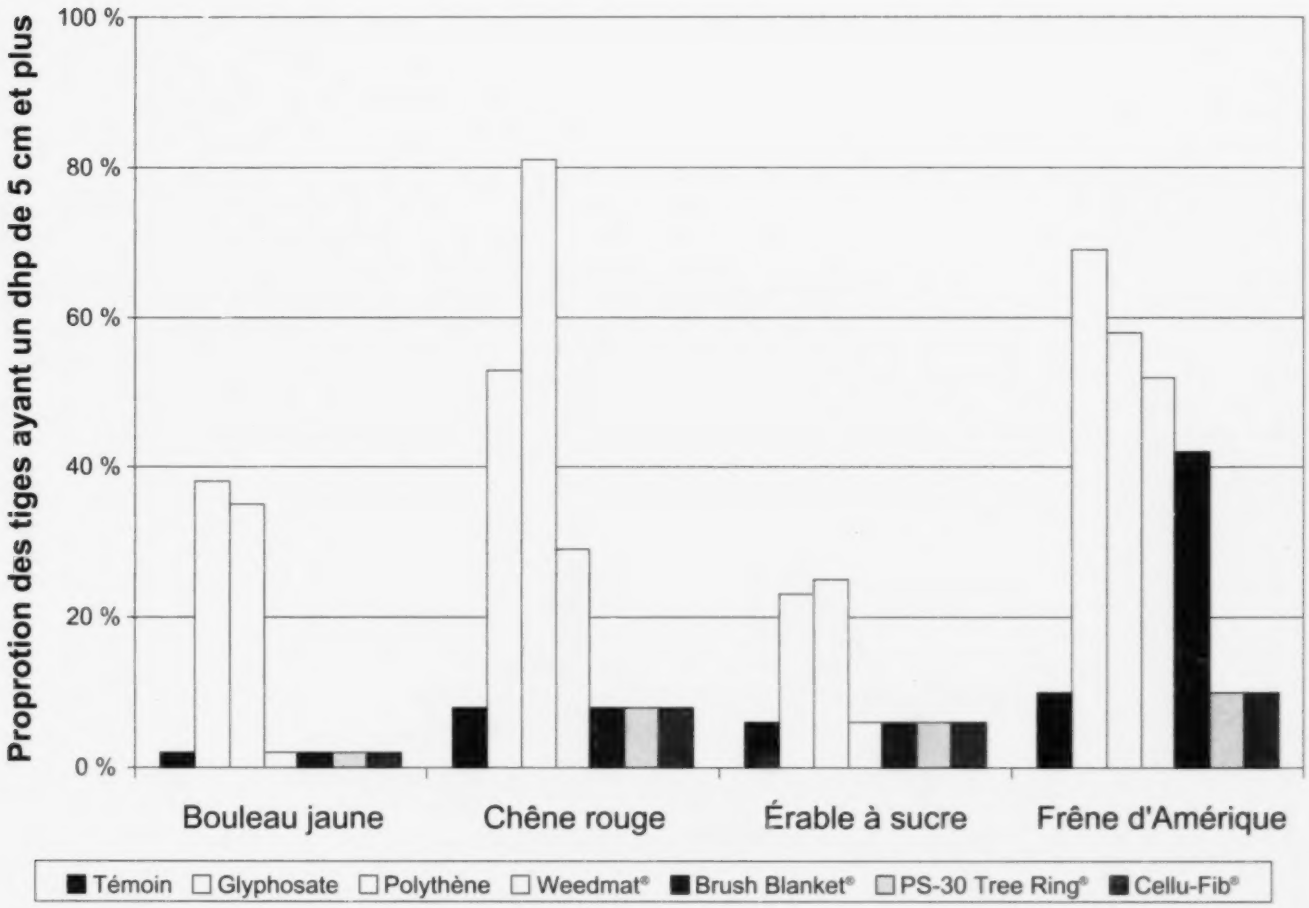


Figure 11

Proportion des tiges ayant un dhp de 5 cm et plus après sept saisons de croissance (1999).

Chapitre trois

Discussion

3.1 Les caractéristiques édaphiques

Les résultats de l'analyse des caractéristiques édaphiques de la station de Beaumont, notamment ceux en rapport avec le pH des vingt premiers centimètres du sol, indiquaient que la culture des feuillus y serait relativement difficile. Les exigences de l'érable à sucre et du frêne d'Amérique à cet égard sont telles (YAWNEY 1982, DUMONT 1995, ROBITAILLE1995) que leur développement à Beaumont pouvait être compromis. Quant au bouleau jaune et au chêne rouge, le pH du sol atteignait à peine les valeurs requises pour satisfaire leurs exigences nutritionnelles (DUMONT 1995). Toutefois, tous les autres paramètres physico-chimiques du sol semblaient être à un niveau acceptable pour les quatre espèces (DUMONT 1995).

Pour déterminer dans quelle mesure le faible pH du sol pouvait nuire au développement des feuillus, nous avons comparé l'évolution de la croissance en hauteur à Beaumont avec celle d'autres plantations réalisées dans des conditions semblables. En effet, la hauteur totale à un âge donné est en lien direct avec la fertilité de la station (HUBERT 1981). Le tableau 7 présente des comparaisons de hauteur totale moyenne de quelques plantations réalisées dans l'Est du Canada où on a utilisé les mêmes espèces qu'à Beaumont. Dans ce tableau, la hauteur totale moyenne des feuillus de Beaumont est celle que les arbres atteignaient au même âge que celui des plantations de référence. L'environnement de la plantation, l'âge, le type et le gabarit des plants utilisés ainsi que les traitements pour maîtriser la végétation concurrente dans ces autres études étaient semblables à celles de Beaumont.

À l'exception du Chêne rouge dans COGLIASTRO *et al.* (1993), dont la hauteur moyenne à trois ans est supérieure à celle des chênes de Beaumont, tous les sujets de Beaumont ont une hauteur totale moyenne supérieure à celle présentée dans les plantations de référence. Or, dans toutes ces études, on rapporte des valeurs de pH du sol nettement plus élevées que celle de la station de Beaumont. Ces premières se situent davantage à l'intérieur du registre des valeurs optimales pour les quatre espèces feuillues qu'à Beaumont. Cette observation démontre que la valeur du pH du sol à Beaumont ne reflète pas sa fertilité réelle. Les valeurs élevées de la saturation en bases et de la concentration en N minéral et en P assimilable semblent en effet être en contradiction avec le pH relativement faible.

Le passé agricole récent de la station a peut-être contribué à enrichir le sol de matière organique, par l'épandage de matières résiduelles fertilisantes, dont la décomposition et l'incorporation dans le sol ont aidé à maintenir la disponibilité des éléments nutritifs majeurs à un niveau plus élevé que ce qu'indique le pH. La teneur en matière organique du sol de 5 % constitue d'ailleurs un optimum pour la culture des feuillus nobles (BALLEUX et VAN LERBERGHE 2001).

3.2 Mortalité

En plantation de feuillus, lorsque le choix du site de plantation et le niveau de protection contre les agents perturbateurs sont adéquats, le taux de mortalité est rarement élevé, comme le rapportent plusieurs auteurs (COGLIASTRO *et al.* 1990, COGLIASTRO *et al.* 1993, TRUAX et GAGNON 1993, ROBITAILLE 1994b, DUPUIS 1997, TRUAX *et al.* 2000). La bonne régie de culture des plants produits par les pépinières forestières québécoises, des plants costauds (faible H/D) avec un système racinaire dense et étalé, leur assurent déjà une bonne reprise et une croissance rapide et vigoureuse (MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC 1999).

C'est ce que nous avons constaté pour le chêne rouge et le frêne d'Amérique, dont le taux de mortalité est demeuré sous la barre des 4 % après sept saisons de croissance, sans différence significative entre les traitements. Ces deux essences ont montré un degré de tolérance élevé envers la compétition herbacée en affichant un bon taux de survie dans les parcelles témoins et dans celles avec des paillis organiques, les moins bien protégées contre la végétation concurrente. Les conditions édaphiques de Beaumont favorables au développement de ces deux espèces et la protection adéquate de la plantation contre les rongeurs sont sans doute responsables du faible taux de mortalité. VON ALTHEN (1990) indique d'ailleurs que le frêne d'Amérique

Tableau 7

Comparaison de la hauteur totale des feuillus de Beaumont avec celle des feuillus de différentes stations, selon l'âge et le traitement de répression de la végétation concurrente

Étude	Texture pH du sol	Caractéristiques des feuillus plantés	Traitement de répression	Hauteur (m) comparée	Hauteur (m) Beaumont
(1)	Loam pH 5,1	Chêne rouge 7 ans	Glyphosate	3,2	4,5
			Aucun	2,2	3,0
		Frêne d'Amérique 7 ans	Glyphosate	1,8	4,7
			Aucun	0,8	3,8
(2)	Loam pH 6,3	Chêne rouge 3 ans	Glyphosate	2,1	1,5
			Aucun	0,8	0,9
		Frêne d'Amérique 3 ans	Glyphosate	1,4	1,8
			Aucun	0,7	1,2
(3) A	Loam sableux pH 6,3	Bouleau jaune 4 ans	Glyphosate	1,7	2,9
(3) B	Loam sableux pH 6,4	Chêne rouge 4 ans	Glyphosate	1,2	2,4
(3) C	Loam pH 7,4	Érable à sucre 4 ans	Glyphosate	1,0	2,7
(3) C	Loam pH 7,4	Frêne d'Amérique 4 ans	Glyphosate	1,3	2,6
(4)	Loam argileux pH 6,6	Frêne d'Amérique 3 ans	Polythène	1,0	2,0
			Simazine	0,9	1,8*
			Aucun	0,6	1,2
(5)	Loam sableux pH 6,9	Érable à sucre 4 ans	Désherbage mécanique	1,4	2,7*
			Aucun	0,9	1,0
(6)	Loam	Bouleau jaune 7 ans	?	2,9	3,6*
(7)	Loam	Érable à sucre 4 ans	Simazine	2,0	2,7*
	Loam	Érable à sucre 3 ans	Simazine	0,9	1,9*
	Loam	Érable à sucre 2 ans	Simazine	1,1	1,2*

Références et localisation :

(1) Truax *et al.* (2000), Saint-Benoît-du-Lac
(2) Cogliastro *et al.* (1993), MRC Haut-Saint-Laurent, site « *chenail* »
(3) Cogliastro *et al.* (1997), MRC Haut-Saint-Laurent, A – site « *wet marine* », B – site « *stony littoral* », C – site « *dry-mesic moraine* »
(4) von Althen (1971), Sud de l'Ontario, *comparé au traitement glyphosate
(5) von Althen (1977), Sud de l'Ontario, *comparé au traitement glyphosate
(6) Chipperfiled (1988), Île du Prince-Édouard, *comparé au témoin
(7) von Althen et Webb (1980), Sud de l'Ontario, *comparé au traitement glyphosate.

tolère un large spectre de conditions de sol et de drainage. Ce n'est cependant pas le cas pour le chêne rouge qui profite davantage dans les sols relativement pauvres et bien drainés (Cogliastro *et al.* 1997). Ces derniers auteurs ont observé de bons taux de survie pour les deux espèces feuillues lorsque les conditions édaphiques des sites étaient favorables à leur établissement. Cogliastro *et al.* (1990) ont également obtenu de bons résultats de survie pour le frêne d'Amérique dans un loam argileux et davantage de mortalité pour le chêne rouge lorsque la répression de la végétation concurrente était moins efficace (témoin et culture intercalaire de légumineuses). Truax *et al.* (2000) ont noté un fort taux de survie pour le chêne rouge autant que pour le frêne d'Amérique dans une ancienne friche herbacée sur loam, avec l'emploi de phytocides ou non.

Pour l'érable à sucre comme pour le bouleau jaune, il y a eu à Beaumont une soudaine progression de la mortalité causée par l'attaque d'un pathogène qui a particulièrement touché les parcelles témoins et celles protégées par

le paillis PS-30 Tree Ring®. L'équation est facile à résoudre dans ces deux cas : protection inadéquate contre la végétation concurrente signifie augmentation de la vulnérabilité aux maladies et de la mortalité, comme le rapportent également BALLEUX et VAN LERBERGHE (2001) et DUPUIS (1997).

D'autres études mentionnent des taux de survie plus ou moins élevés pour ces deux espèces. Avec le bouleau jaune, HANNAH et TURNER (1981) ont obtenu un taux de survie de 68 % en plantation forestière automnale, GRABER (1978) a observé un taux de 98,8 % après deux saisons de croissance en champ mais COGLIASTRO *et al.* (1997) ont noté un taux moyen inférieur à 30 % après quatre ans en friche herbacée et HOYLE (1984) a observé un taux de 48 % après dix ans en plantation forestière, où le *Phomopsis* a également fait quelques ravages. Pour l'érable à sucre, VON ALTHEN (1983) rapporte un taux de survie de 94 à 97 % après quatre à six ans pour des plants de dimensions comparables, VON ALTHEN et WEBB (1980) ont eu entre 80 et 95 % de survie après quatre ans, STOUT (1986) rapporte un taux de 49 % après 22 ans et COGLIASTRO *et al.* (1997) ont mesuré des taux de 15 à 80 % qui variaient selon la nature des stations.

La virulence de l'attaque du *Cylindrocarpon destructans* pour l'érable à sucre avait de quoi surprendre. En effet, les arbres atteints ne montraient généralement aucun signe ou symptôme au début de la saison de croissance mais dépérissaient à une vitesse telle qu'ils mouraient puis cassaient avant la fin de la saison. Le système racinaire des arbres touchés était de dimension beaucoup plus réduite que celui des arbres sains protégés par un paillis de polythène (D. Robitaille, observation personnelle). Pour le bouleau jaune, la progression de la maladie a été tout aussi fulgurante que pour l'érable à sucre. En une seule année, presque tous les individus situés dans les parcelles témoins des blocs 1, 2 et 3 et la majorité de ceux qui avaient reçu le paillis PS-30 Tree Ring® ont été atteints par la maladie et sont morts rapidement. Les bouleaux du bloc 4 ont mieux résisté à l'attaque du *Phomopsis*. Dans ce bloc, un peu à l'écart des autres, les arbres sont plus rapprochés de la forêt avoisinante, donc plus à l'abri du vent. Cela leur a été profitable puisqu'ils ont crû plus rapidement, toutes espèces et tous traitements confondus (D. Robitaille, observation personnelle). Le pathogène s'est également propagé aux parcelles soumises au glyphosate, au paillis de polythène et au paillis Weedmat®, entraînant dans la mort d'environ 20 % des bouleaux jaunes.

3.3 Analyses foliaires

Les analyses foliaires confirment que le sol de la station de Beaumont ne comportait pas de déficience minérale importante si l'on considère les résultats obtenus là où la protection contre les herbacées était la plus efficace. En effet, les valeurs les plus élevées de concentration en azote foliaire moyenne en 1993 ont été de 2,84, 2,19, 2,06 et 2,72 % pour le bouleau jaune (paillis de polythène), le chêne rouge (paillis de polythène), l'érable à sucre (paillis Brush Blanket®) et le frêne d'Amérique (glyphosate) respectivement. Ces valeurs sont comparables à celles publiées dans COGLIASTRO *et al.* (1993) avec 2,40 % pour le chêne rouge et 2,46 % pour le frêne d'Amérique, à celles de DUPUIS (1997) de 2,14 et 2,33 % pour l'érable à sucre et le frêne d'Amérique et à celles de TRUAX et GAGNON (1993) de 2,19 % pour le frêne d'Amérique.

Le tableau suivant présente, pour l'érable à sucre, une comparaison des données de Beaumont avec les seuils de concentration foliaire critique et optimum établis par OUIMET (1995).

Élément	Seuil critique ($g\ kg^{-1}$)	Seuil optimum ($g\ kg^{-1}$)	Registre des valeurs de Beaumont ($g\ kg^{-1}$)
N	16,0	20,0	13,4 (Témoin) – 20,6 (Brush Blanket®)
P	1,22	1,80	1,12 (Témoin) – 2,09 (Brush Blanket®)
K	6,00	8,80	5,19 (Témoin) – 7,80 (Polythène)
Ca	6,00	18,6	8,10 (Témoin) – 12,5 (Brush Blanket®)
Mg	1,20	2,30	1,50 (Polythène) – 1,8 (Brush Blanket®)

Il est ainsi permis de croire que les conditions édaphiques de Beaumont sont adéquates à la culture de l'érable à sucre, comme l'expriment les données d'analyse foliaire. Il est également très clair que des différences importantes existent entre les traitements, autant pour l'érable que pour les autres espèces, en regard de la masse foliaire, de la masse foliaire spécifique et de la masse spécifique des éléments nutritifs majeurs (Tableaux 4 et 5 et Figures 4 et 5).

Les traitements ont eu très peu d'effets significatifs sur la surface foliaire, contrairement à ce qui a été observé dans d'autres études sur les plantations de feuillus (COGLIASTRO *et al.* 1990, KOLB et STEINER 1990, BURKE *et al.* 1992, COGLIASTRO *et al.* 1993, LAMBERT *et al.* 1994, TRUAX *et al.* 1994, TRUAX 1995, DUPUIS 1997). Selon NAMBIAR et SANDS (1993), la surface foliaire est la mesure la plus sensible du degré de stress vécu par un plant, qu'il soit de nature biotique, abiotique, engendré par la concurrence ou par une déficience nutritive. Alors en 1993, l'année de la mise en terre des plants à Beaumont, il est possible que la concurrence exercée par la végétation herbacée qui s'implantait ne fût pas suffisamment forte pour exercer un effet significatif sur la surface foliaire.

Il faut mentionner que la station de Beaumont profite de conditions environnementales qui favorisent le développement des arbres et de leur feuillage. La station est située à l'abri du vent, ce qui entraîne une plus grande efficacité de l'appareil photosynthétique, même pour les arbres les moins bien protégés contre la végétation concurrente. TELEWSKI (1995) indique en effet que le vent peut réduire la surface foliaire en retardant l'expansion du feuillage en développement, limitant ainsi la surface photosynthétique active. Il précise par ailleurs que la poussée du vent dans une direction constante et le brassage mécanique de la cime ont pour effet de regrouper les feuilles d'un même côté, de réduire la surface photosynthétique active et de modifier les conditions atmosphériques autour des feuilles. Cela mène inévitablement à une baisse de l'activité photosynthétique, donc à un ralentissement de la croissance. Il est donc possible que la faible exposition au vent de la station de Beaumont ait atténué les différences de surface foliaire entre les arbres très bien et moins bien protégés. Beaumont profite en plus de la proximité du fleuve Saint-Laurent qui lui procure une saison de croissance plus longue et un microclimat plus tempéré que d'autres stations de la même région qui ne subissent pas de façon aussi marquée l'influence de ce grand plan d'eau.

Il appert cependant que la masse spécifique foliaire et celle des éléments nutritifs foliaires étaient des paramètres plus sensibles aux effets des conditions microenvironnementales induites par les traitements. Ainsi, d'une manière générale, les traitements les plus efficaces ont permis aux jeunes plants de développer des feuilles plus épaisses (masse spécifique plus élevée) et mieux pourvues en N, P, K et Ca. La quantité totale d'éléments nutritifs au plant serait donc plus élevée pour ceux qui ont profité des meilleurs traitements que pour les autres, si la surface foliaire totale était comparable. Or, la quantité de feuilles et la surface foliaire totale des plants protégés par les paillis de plastique et le glyphosate étaient nettement plus élevées que pour ceux ayant reçu les paillis organiques ou ceux servant de témoin (D. Robitaille, observation personnelle). La capacité photosynthétique des arbres les mieux protégés serait donc meilleure que celle des arbres les moins bien protégés, conclusion à laquelle arrivent également COGLIASTRO *et al.* (1993).

3.4 Paramètres morphologiques et dendrométriques

Pour toutes les espèces plantées à Beaumont, les meilleurs traitements de répression ont concouru à former des arbres plus hauts, une hauteur cumulative plus grande, de plus gros diamètres, une plus forte surface terrière et une proportion plus élevée de tiges de 5 cm et plus en 1999. La figure 12 présente les caractéristiques morphologiques et dendrométriques avec les quatre espèces soumises aux sept traitements de répression de la végétation concurrente à la septième saison de croissance.

Les différences de croissance en hauteur entre les meilleurs traitements et les moins efficaces tendent à augmenter dans le temps (Figure 6) pour atteindre plus de 1 m pour le bouleau jaune et le frêne d'Amérique et plus de 2 m pour le chêne rouge et l'érable à sucre après sept saisons de croissance (Figure 12). Les différences de longueur de pousse annuelle atteignent leur maximum en 1996 et 1997 (Figure 7), avec des valeurs supérieures à 30 cm, puis elles tendent à diminuer quelque peu dans le temps. Elles demeurent tout de même à près de 30 cm pour le bouleau jaune, le chêne rouge et le frêne d'Amérique. Pour l'érable à sucre, ces différences sont de moins de 10 cm (Figure 12). Quant aux différences de hauteur cumulative, elles s'accroissent également dans le temps à la faveur des meilleurs traitements (Figure 8). La mortalité ayant fortement touché les parcelles témoin pour le bouleau jaune et l'érable à sucre, il n'est pas étonnant de constater des différences de plus de 4 000 m/ha après sept ans pour ces deux espèces. Pour le chêne rouge comme pour le frêne d'Amérique, ces différences se situent autour de 2 000 m/ha (Figure 12). Non seulement les meilleurs traitements permettent-ils aux arbres de se développer plus rapidement en hauteur mais ces différences se maintiennent ou s'accroissent dans le temps.

En ce qui concerne l'évolution de la croissance en diamètre, les différences entre les meilleurs traitements et les moins performants augmentent dans le temps (Figure 9) pour atteindre plus de 2 cm pour le frêne d'Amérique, plus de 3 cm pour le bouleau jaune et le chêne rouge et plus de 4 cm pour l'érable à sucre (Figure 12). Le scénario est identique avec l'évolution de la surface terrière (Figure 10), variable

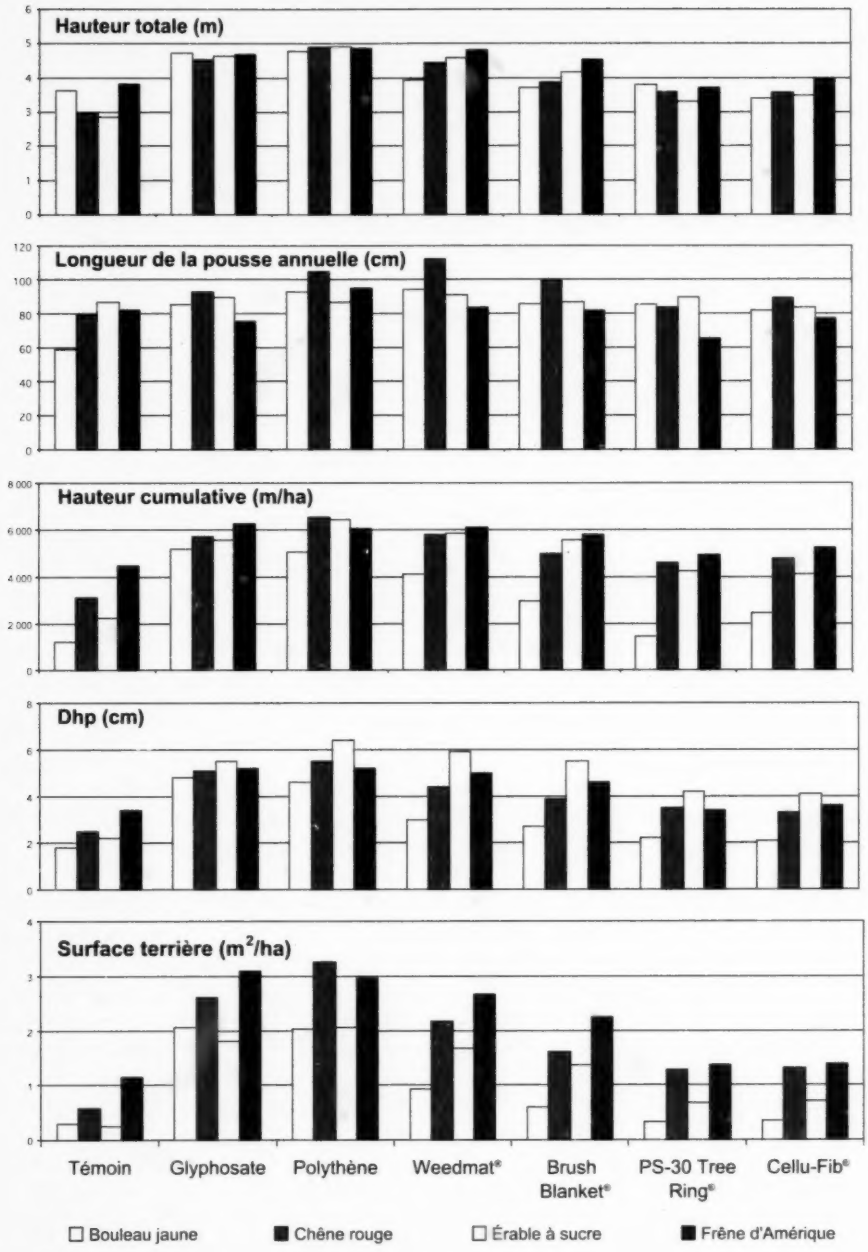


Figure 12

Moyennes de la hauteur totale, de la longueur de la pousse, de la hauteur cumulative, du dhp et de la surface terrière du bouleau jaune, du chêne rouge, de l'érable à sucre et du frêne d'Amérique après sept saisons de croissance (1999).

qui ajoute, à l'analyse du diamètre, l'influence de la mortalité sur la structure de la plantation. Les différences de surface terrière après sept saisons atteignent 1,5 m²/ha pour le bouleau jaune et l'érable à sucre, 2 m²/ha pour le frêne d'Amérique et 2,5 m²/ha pour le chêne rouge (Figure 12).

Par ailleurs, la figure 11 illustre bien l'influence des traitements sur la vitesse de développement du diamètre des espèces exprimée par la proportion de tiges à atteindre 5 cm et plus au dhp en sept ans ; les meilleurs traitements étant le paillis de polythène et le glyphosate pour toutes les espèces. TRUAX *et al.* (2000) utilisent un indice semblable (dhp ≥ 1 cm) pour comparer, après huit saisons de croissance, la performance de plantations de chênes et de frênes dans divers environnements. Ces auteurs ont observé une proportion très faible de frênes d'Amérique à franchir le seuil de 1 cm et plus au dhp dans une friche herbacée avec application de glyphosate (26 %) ou non (0 %). Le chêne rouge a obtenu de meilleures performances avec des taux de 88 et 85 % dans les mêmes conditions. Avec une année de croissance en moins et un indice de 4 cm au dhp plus élevé, les proportions obtenues à Beaumont ont été de 69 % (glyphosate), 58 % (polythène) et 7 % (témoin) pour le frêne d'Amérique et de 81 % (polythène), 53 % (glyphosate) et 8 % (témoin) pour le chêne rouge.

Plusieurs des paramètres morphologiques et dendrométriques exhibaient une tendance favorable au glyphosate jusqu'en 1996, lorsque les effets de celui-ci étaient comparés à ceux du paillis de polythène. Tel que recommandé par VON ALTHEN (1990) et expérimenté par VON ALTHEN (1983) avec l'érable à sucre, l'herbicide a été appliqué à toute la surface des parcelles traitées au cours des trois premières saisons de croissance, c'est-à-dire de 1993 à 1995 inclusivement. Après quoi, le traitement a été limité au fauchage de la repousse. Il est permis de croire que si l'application de l'herbicide avait été prolongée de quelques années, les données sur les paramètres morphologiques et dendrométriques auraient été à l'avantage du glyphosate. Étant donné que l'application de phytocides permet au sol de se réchauffer rapidement et de réduire les pertes d'eau du sol par transpiration (MCDONALD et HELGERSON 1990), il est probable que la poursuite du traitement aurait procuré des conditions encore meilleures pour le développement d'un système racinaire performant et étendu (ÖRLANDER *et al.* 1990). Cela se serait probablement soldé par de plus forts développements en hauteur et en diamètre que ceux que nous avons enregistrés.

En regard de la structure de la plantation, après sept saisons de croissance, le chêne rouge protégé par paillis de polythène et le frêne d'Amérique avec le paillis de polythène ou le glyphosate présentent les potentiels les plus intéressants à Beaumont. Les arbres les plus hauts et les parcelles présentant les plus fortes valeurs de hauteur cumulative, de surface terrière et de proportion de tiges de 5 cm et plus au dhp se retrouvent à l'intérieur de ces combinaisons. N'eut été de la mortalité qui a affligé l'érable à sucre en 1997, cette espèce présentait également un bon potentiel puisque les survivants sur paillis de polythène ont développé les tiges les plus hautes et les plus grosses après sept saisons de croissance. Le choix des espèces plantées à Beaumont semble donc adéquat et la protection offerte par les meilleurs traitements a contribué à la survie des arbres et au bon rendement de la plantation.

Ces observations sur l'évolution des paramètres morphologiques et dendrométriques tendent à démontrer que les arbres non protégés de la végétation concurrente, ou ceux pourvus d'une protection moins durable (paillis organiques), ont souffert de la concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs du sol. Au contraire, les meilleurs traitements (polythène et glyphosate) ont permis aux espèces de mieux profiter du potentiel de la station. Dès la première saison de croissance, l'analyse foliaire indiquait déjà cette tendance ; la masse spécifique des éléments majeurs était plus faible pour les témoins que dans l'ensemble des traitements. Le paillis de polythène enregistre les plus fortes valeurs.

AUSSENAC (1985), GORDON *et al.* (1989) et ÖRLANDER *et al.* (1990) considèrent que les stress hydriques répétés engendrent des réductions de croissance en diamètre et en hauteur, particulièrement pour les jeunes feuillus en situation de concurrence herbacée. DUPUIS (1997) a par ailleurs observé, dans une friche herbacée, une grande fluctuation des potentiels hydriques du sol au gré des précipitations dans des parcelles témoins non désherbées. Après quelques jours sans pluie, le potentiel hydrique chutait rapidement, se retrouvant quelquefois en deçà de la limite de détection de - 1 MPa qui correspond à un état situé près du seuil de flétrissement. Les parcelles protégées par un paillis de polythène, au cours des mêmes épisodes, faisaient preuve d'une grande stabilité autour de - 0,02 MPa, correspondant à la capacité au champ du sol. Cet auteur a également remarqué des différences importantes entre le potentiel hydrique foliaire pré-aube à la faveur des feuillus protégés par un paillis de polythène par rapport à ceux n'ayant reçu aucune protection. Il attribue la réduction du stress hydrique à l'absence de végétation sous les paillis, ce qui contribue à maintenir les réserves d'eau du sol par la réduction de la transpiration et de l'évaporation. Cette assertion est appuyée par les observations de FLINT et CHILDS (1987), DAVIES (1988b), APPLETON *et al.* (1990) et MCDONALD et HELGERSON (1990).

La température du sol est également un facteur qui peut stimuler le développement des arbres. Örlander *et al.* (1990) mentionnent que le prélèvement de l'eau et des éléments nutritifs ainsi que le développement des racines sont affectés par la température du sol. Le paillis de polythène et l'utilisation de phytocides favorisent le réchauffement de la surface du sol par l'absorption d'une proportion plus importante de la radiation solaire incidente et la réduction du refroidissement par l'évaporation plus restreinte de l'eau du sol par rapport à d'autres traitements (McDonald et Helgerson 1990). Robitaille (1994b) a noté, dans un dispositif de mesure en continu, des différences de températures moyennes quotidiennes du sol de 1 à 2 °C à une profondeur de 5 cm entre des parcelles avec paillis de polythène et des parcelles témoins. Dupuis (1997) considère que le meilleur développement du frêne d'Amérique et de l'érable à sucre protégés par des paillis de polythène ou par l'application de glyphosate est en partie redevable aux températures plus élevées dans le sol. Cogliastro *et al.* (1990), Cogliastro *et al.* (1993) et Truax et Gagnon (1993) ont aussi observé des températures plus élevées lorsque la surface du sol était plus exposée à la radiation incidente (désherbage par rotoculteur ou herbicide) ou protégée par paillis de plastique.

Par ailleurs, lorsqu'elles sont placées en situation de disponibilité réduite d'éléments nutritifs, la plupart des espèces montrent un rapport tige : racines relativement faible (Bloom *et al.* 1985, Burke *et al.* 1992, Cogliastro *et al.* 1993). Les plants stressés investissent davantage dans la masse racinaire afin d'agrandir la zone de prospection dans le sol (Sands et Mulligan 1990). Dupuis (1997) précise que pour le frêne d'Amérique planté en friche herbacée, plus les ressources sont disponibles, plus les plants produisent une surface racinaire importante et une proportion moins élevée de racines fines. Les plants investissent moins dans la production de nouvelles racines de petit calibre, ce qui a pour effet d'augmenter leur longévité, d'économiser des ressources et de les redistribuer vers la croissance d'autres tissus (Alexander et Fairley 1983). Aucune donnée à ce sujet n'a été récoltée à Beaumont. Toutefois, les arbres les mieux protégés étaient pourvus d'un système racinaire beaucoup plus développé que celui des témoins (observation personnelle D. Robitaille).

3.5 L'étude par les contrastes et les mesures répétées des paramètres morphologiques et dendrométriques

Dans la multitude de décisions que les producteurs forestiers doivent prendre pour cultiver les feuillus en plantation, celle du choix de la méthode de protection contre la végétation concurrente compte parmi les plus importantes. Plusieurs échecs de plantation de feuillus sont dus à un niveau de protection mal ajusté à la concurrence et à l'ignorance de la menace réelle qu'elle représente pour la survie et le développement des arbres (Bazin 1990, Dumont 1997). L'analyse des traitements de répression par les contrastes orthogonaux *a priori* et l'analyse des mesures répétées ont permis de répondre à certaines des questions que les producteurs forestiers se posent à cet égard, notamment en ce qui concerne l'efficacité des paillis.

Parmi les paillis utilisés, ceux faits de plastique donnent souvent de très bons résultats par les effets qu'ils induisent sur la température et l'eau du sol et sur le microenvironnement aérien des plants. Une multitude de types de paillis de plastique sont disponibles, ceux-ci se distinguant par leur épaisseur, leur couleur, leur dimension, leurs propriétés optiques ou leur perméabilité à l'eau et aux échanges gazeux sol-atmosphère. Nous avons choisi de comparer des paillis individuels plutôt qu'en longueur, car les premiers sont plus utilisés que les seconds. Le paillis Brush Blanket® est constitué de polyéthylène IRT-76 (Infra-red transmiting) qui transmet le proche infrarouge (700 à 2 150 nm) et emprisonne sous sa surface l'infrarouge moyen, ce qui, en principe, accentue l'effet de serre qui se produit en dessous de la majorité des paillis de polyéthylène (Robitaille 1993b). Le paillis Weedmat® est composé de fibres de polyéthylène pressées et sa surface est parsemée de microperforations qui le rendent plus perméable que les autres paillis du même genre. Quant au paillis de polythène, il s'agit du standard utilisé dans l'industrie de la plasticulture. C'est le type de paillis le plus fréquemment utilisé dans la production maraîchère (Robitaille 1993 b). Ces trois types représentent autant de catégories de paillis de plastique qui sont disponibles sur le marché.

Les paillis organiques ont l'avantage d'être biodégradables, donc de disparaître de l'environnement de la plantation en quelques années. Leur durabilité et leurs effets souvent défavorables sur le réchauffement du sol constituent leur principal handicap. Le paillis Cellu-Fib®, fabriqué au Québec, est une membrane de 0,2 mm d'épaisseur composée de fibres cellulosiques, de cire et de latex. Selon des études menées en laboratoire, le paillis devait empêcher le développement de la végétation herbacée pendant une période minimale de trois ans (Cascades Multipro Inc. 1993). Toutefois, aucune étude de terrain n'avait permis de valider cette affirmation. Par ailleurs, le paillis PS-30 Tree Ring® n'avait jamais été testé dans des plantations de feuillus et encore moins dans celles du Québec. On pouvait

douter de son efficacité par la prédisposition de la paille qui le compose à se dégrader facilement et rapidement.

L'analyse par les contrastes et les mesures répétées a permis de déterminer si les traitements exercent des effets différents sur le développement des arbres et si ces effets s'accroissent, se stabilisent ou diminuent dans le temps. L'efficacité des méthodes de protection peut ainsi être mesurée en regard du rendement de la plantation et de la durabilité de leurs effets.

Le contraste *traitements contre témoin* met en évidence la nécessité de protéger la plantation contre la végétation concurrente dans les friches herbacées, quelle que soit la méthode employée. Ce contraste a bien démontré que l'absence de répression des herbacées conduit invariablement à une croissance ralentie des arbres et à une plantation moins bien développée. Les plus fortes différences avec la plupart des paramètres se sont produites avec ce contraste et celles-ci progressent encore après sept saisons de croissance. Toutefois, le frêne d'Amérique est, des quatre espèces plantées à Beaumont, celle qui semble le moins souffrir de la concurrence. Après quelques saisons de croissance, les différences relevées entre les témoins et les traitements exhibent avec la majorité des paramètres un certain plafonnement. À compter de 1996, les différences d'accroissement, c'est-à-dire la variation d'une année à l'autre des différences de hauteur, de hauteur cumulative et du diamètre, sont très faibles pour cette espèce. L'évolution des différences de longueur de la pousse annuelle affiche par ailleurs cette même tendance. C'est donc dire qu'après quatre saisons de croissance, le rythme de développement du frêne d'Amérique est à peu près le même pour le témoin que dans l'ensemble des traitements confondus. Avec ces derniers toutefois, les frênes conservent leur avance que leur ont procurée les premières années de croissance.

Le contraste *paillis de plastique contre paillis organiques* permet de comparer l'efficacité de deux grandes familles de paillis : ceux ayant une durabilité de cinq ans et plus (paillis de plastique) par rapport à ceux ayant une durabilité de trois ans et moins (organiques). Pour toutes les espèces et avec tous les paramètres morphologiques et dendrométriques, les paillis de plastique dans leur ensemble ont produit de meilleurs résultats que les paillis organiques. Les différences de hauteur totale, de hauteur cumulative, de diamètre et de surface terrière augmentent de façon régulière pour toutes les espèces. Cela signifie que l'écart entre les plantations protégées par paillis de plastique et celles protégées par paillis organiques s'accroît au fil des ans. Les paillis organiques représentent donc un choix moins approprié que les paillis de plastique pour protéger les feuillus contre la végétation concurrente.

Les contrastes *Cellu-Fib® contre PS-30 Tree Ring®* et *paillis de polythène contre autres paillis de plastique* ont permis de déterminer, parmi les paillis organiques ou de plastique, ceux qui offraient la plus grande efficacité. Les deux paillis organiques ont, somme toute, exercé des effets semblables sur les quatre espèces feuillues. Après sept saisons de croissance, aucun des deux paillis ne semble être plus recommandable que l'autre. Par contre, pour les paillis de plastique, le paillis de polythène est celui qui a procuré les meilleures conditions de croissance pour le bouleau jaune, le chêne rouge et l'érable à sucre. Pour le frêne d'Amérique, tous les paillis de plastique ont exercé des effets semblables sur tous les paramètres morphologiques et dendrométriques puisque peu de différences significatives ont été obtenues.

Le contraste *grand paillis contre petit paillis* a servi à vérifier si les effets des paillis sont proportionnels à leurs dimensions. Puisque ce contraste opposait le paillis de polythène à tous les autres paillis, y compris les paillis organiques dont les performances ont été plutôt mauvaises, il est évident que le premier est plus intéressant que tous les autres dans leur ensemble. Ici, l'effet de la dimension du paillis est confondu à celui de la durabilité. Toutefois, le contraste *paillis de polythène contre autres paillis de plastique* a permis de vérifier en partie l'hypothèse des effets croissant avec la dimension du paillis, en ne retenant que les paillis de plastique. Les résultats des deux contrastes ne diffèrent pas tellement l'un de l'autre et les conclusions sont sensiblement les mêmes. Toutes les espèces ont mieux réagi lorsqu'elles étaient protégées par le paillis de polythène plutôt que par les autres paillis de plus petites dimensions et les différences s'accroissent encore après sept saisons de croissance.

Quant au contraste *polythène contre glyphosate*, il a permis de déterminer si les deux traitements assuraient une protection différente contre les herbacées. Le paillis de polythène était certainement, de ceux utilisés à Beaumont, celui qui offrait la meilleure alternative aux phytocides. Sauf quelques différences ponctuelles à la faveur du paillis de polythène, qui surviennent surtout vers la fin de la période de mesure, pour le chêne rouge en particulier, les deux traitements ont procuré des conditions de croissance tout aussi favorables au développement des feuillus plantés à Beaumont. Une tendance favorisant le traitement herbicide avait toutefois été notée en 1995 et en 1996 pour toutes les

espèces et la majorité des paramètres. La pousse annuelle est d'ailleurs significativement plus longue pour les feuillus protégés par le phytocide que pour ceux protégés par le paillis de polythène pendant cette période. La pousse annuelle étant un bon indicateur des conditions microenvironnementales des plants (MUNSON et TIMMER 1990), cette observation nous permet de croire que la végétation concurrente qui s'est installée à la suite des trois années du traitement phytocide a exercé un niveau de concurrence propre à ralentir le rythme de croissance des arbres protégés. Bien que le rendement de la plantation après sept saisons de croissance soit satisfaisant avec le traitement phytocide, il semble que son utilisation limitée aux trois premières saisons n'ait pas permis d'exploiter le plein potentiel de la station à y cultiver des feuillus.

Les meilleurs traitements employés à Beaumont, en prenant en compte les résultats de l'analyse des paramètres morphologiques et dendrométriques, de la mortalité et des analyses foliaires, sont l'application annuelle de glyphosate au cours des trois premières saisons de croissance et le paillis de polythène. Les moins bons traitements sont les paillis organiques et le témoin. Le paillis Cellu-Fib® a aussi donné des résultats peu encourageants dans des plantations réalisées en Ontario et au Québec. WAGNER *et al.* (1944, 1995) ont noté que 35 % des paillis Cellu-Fib® se trouvaient dans un état avancé de dégradation après une seule saison de croissance dans une plantation de pin blanc établie dans une friche herbacée et ROBITAILLE (1994) a observé des températures et des teneurs en humidité du sol moins favorables en dessous de ce paillis qu'avec d'autres traitements. Par contre, DUPUIS (1997) a obtenu des résultats intéressants avec ce paillis au cours de la première saison de croissance pour l'érable à sucre.

Plusieurs auteurs rapportent d'excellents résultats avec l'application de phytocides pour maîtriser la végétation concurrente dans les friches herbacées. La stratégie d'établissement des plantations de feuillus sur les terres agricoles abandonnées, préconisée par VON ALTHEN (1971, 1977, 1979, 1990) et VON ALTHEN et WEBB (1980) dans le sud de l'Ontario, repose essentiellement sur l'utilisation de glyphosate pour la préparation de terrain et l'application annuelle de simazine pendant un minimum de trois ans suivant la mise en terre des plants. Dans le contexte de la mise au rancart des phytocides en milieu forestier au Québec, cette approche n'est cependant pas recommandable.

Conclusion

Protéger les plantations de feuillus nobles contre la végétation concurrente dans les friches herbacées apparaît clairement comme une nécessité à l'analyse des résultats obtenus à Beaumont. Pour les quatre espèces plantées, la protection contre la végétation concurrente a été favorable au développement des jeunes arbres. Dans le cas particulier du bouleau jaune, et dans une certaine mesure dans celui de l'érable à sucre, l'absence de traitement contre la végétation concurrente a également compromis leur survie.

La protection des plantations de feuillus contre la végétation concurrente dans les friches herbacées est essentielle mais encore faut-il choisir les meilleurs traitements qui combinent efficacité, durabilité, coûts raisonnables et acceptabilité sociale. Dans cette étude, deux traitements se démarquent des autres par leur efficacité et la durabilité de leurs effets : l'application annuelle de glyphosate au cours des trois premières saisons de croissance et l'utilisation du paillis de polythène. Sur cette base de réflexion seulement, on peut recommander l'un ou l'autre des deux traitements. Il faut cependant mentionner qu'un changement dans la fréquence, la durée et la surface de l'application du phytocide ou dans la dimension du paillis de polythène aurait pu mener à des conclusions différentes de celles-ci. Aussi, l'efficacité des traitements peut varier en fonction des caractéristiques de la station. Par exemple, les sols lourds ou humides ne conviennent pas aux paillis (Robitaille 1993a) et la dose nécessaire de phytocides doit être ajustée à la texture du sol et à la sensibilité des espèces à protéger (von Althen 1990).

En ce qui a trait au coût du traitement, l'application manuelle de phytocides et l'utilisation de paillis est assez comparable. Dumont (1995) évalue entre 1,00 $/plant et 1,15 $/plant l'achat et la pose des paillis individuels, les moins coûteux étant ceux faits de plastique et les plus coûteux ceux faits de matériaux organiques. Cela représente un investissement d'environ 1 700 $/ha à 1 900 $/ha pour une plantation de la même densité qu'à Beaumont. Trois épandages d'herbicide sur toute la surface de la plantation, avec toutes les précautions nécessaires pour ne pas nuire aux jeunes plants de feuillus, coûtent environ 1 500 $/ha pour l'achat du produit, la mise à l'abri des arbres et l'application sur le terrain.

C'est en ce qui concerne l'acceptabilité sociale que les traitements se distinguent davantage. L'utilisation des paillis organiques et l'absence de protection sont les options les plus acceptables d'un point de vue environnemental. Ces traitements mènent toutefois vers un échec probable car ils menacent la survie des arbres et le développement de la plantation. Les paillis de plastique ne sont pas très esthétiques ; ils se confondent mal à la végétation environnante. De plus, ils donnent l'impression d'être polluants. Toutefois, leur aspect visuel particulier excepté, les paillis de plastique sont très stables dans l'environnement car ils ne se dégradent pas et ne forment pas de composés chimiques avec le sol ou avec l'air. La dépose des paillis de plastique et leur mise au rebus (en les brûlant ou les enfouissant dans le sol) posent plus de problèmes que de les laisser sur place disparaître graduellement sous la végétation et l'humus du peuplement en formation. Parmi les paillis de plastique testés, le paillis de polythène de grandes dimensions et le paillis Weedmat®, parsemé de microperforations qui laissent passer la végétation concurrente au bout de quelques années, apparaissent comme les choix les plus sensés. Dans le contexte de la mise en œuvre par le gouvernement du Québec de la Stratégie québécoise de protection des forêts et du plan d'action sur la diversité biologique, ces paillis constituent les meilleures solutions de rechange aux phytocides.

En résumé, la protection assurée par le paillis de polythène est efficace, durable, abordable et relativement acceptable socialement. Il constitue donc la méthode de protection la plus appropriée à Beaumont. Il convient bien aux plantations de feuillus établies sur d'anciennes friches herbacées dont le sol, qui ne présente pas de conditions extrêmes de texture (sableux ou argileux), a été préalablement labouré et hersé. Dans ces conditions, la majorité des espèces feuillues développera une croissance rapide et vigoureuse, sachant tirer avantage des conditions microenvironnementales favorables que lui procurera ce traitement.

Références bibliographiques

ALEXANDER, I.J. et R.I. FAIRLEY, 1983. *Effects of N fertilisation on populations of fine roots and mycorrhizas in spruce humus.* Dans D Atkinson, K.K.S. Bhat, M.P. Coutts, P.A. Mason et D.J. Read (eds). Tree root systems and their mycorrhizas. p. 49-53.

ANSSEAU, C., G. GAGNON et L. VASEUR, 1996. *Écologie forestière. B. Domaine de l'érablière à tilleul.* Dans : Ordre des ingénieurs forestiers du Québec et Presses de l'Univ. Laval. Manuel de foresterie. p. 171-183.

APPLETON, B.L., J.F. DERR et B.B. ROSS, 1990. *The effect of various landscape weed control measures on soil moisture and temperature, and tree root growth.* J. Arboric. 16(10) : 264-268.

AUSSENAC, G., 1985. *Le potentiel hydrique de l'arbre : une donnée essentielle pour la compréhension de l'écophysiologie des essences forestières.* Sciences du sol 4 : 217-226.

BALLEUX, P. et P. VAN LERBERGHE, 2001. *Le boisement des terres agricoles.* Institut pour le développement forestier. Paris. 128 p.

BAZIN, P., 1990. *Boiser une terre agricole.* Institut pour le développement forestier. Paris. 64 p.

BLACK, C.A, 1965. *Methods of soils analyses.* Am. Soc. Agron., Agronomy 9(2).

BLOOM, A.J., F.S. CHAPIN III et H.A. MOONEY, 1985. *Resource limitation in plant – an economic analogy.* Ann. Rev. Ecol. Syst. 16 : 363-392.

BURKE, M.K., D.J. RAYNALD et M.J. MITCHELL, 1992. *Soil nitrogen availability influences seasonal carbon allocation patterns in sugar maple (*Acer saccharum). Can. J. For. Res. 22 : 447-456.

CANADIAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE, 1993. *Soil sampling and methods of analysis.* Martin R. Carter, editor. 823 p.

CARL, C.M. Jr., 1982. *Nursery practices.* Dans : Sugar maple research : sap production, processing, and marketing of maple syrup. U.S.D.A. For. Serv., Northeastern For. Exp. Stn., Upper Darby (PA). Res. Note NE-218. p. 47-52.

CASCADES MULTI-PRO INC., 1993. *Cellu-Fib. Paillis forestier.* 17 p.

CHIPPERFIELD, P., 1988. *Establishment of yellow birch transplants.* Gov. of Prince Ed. Isl., Dep. Energy & For. Development, Notes No. 10. 4 p.

COGLIASTRO, A., K. BENJAMIN, J. MILLET, J.-P. BRASSARD, D. GAGNON et A. BOUCHARD, 2000. *Reboisement des anciens pâturages sur sol pierreux par la plantation d'espèces d'arbres feuillus de haute valeur : effets de l'accompagnement des espèces arbustives présentes. Rapport d'activités annuel 1999-2000.* Min. des Ress. nat., Dir. de la recherche forestière. Rapport interne. 84 p.

COGLIASTRO, A., D. GAGNON et A. BOUCHARD, 1993. *Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantations dans le sud-ouest du Québec.* Can. J. For. Res. 23 : 199-209.

COGLIASTRO, A., D. GAGNON et A. BOUCHARD, 1997. *Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandonned farmland.* For. Ecol. Manage. 96(1-2) : 49-63.

COGLIASTRO, A., D. GAGNON et A. BOUCHARD, 1998. *La région du Haut-Saint-Laurent, idéale pour la plantation de feuillus.* L'aubelle, Avril-mai 1998 : 8-11.

COGLIASTRO, A., D. GAGNON, D. CODERRE et P. BHÉREUR, 1990. *Response of seven hardwood tree species to herbicide, rototilling, and legume cover at two southern Quebec plantation sites.* Can. J. For. Res. 20(8) : 1172-1182.

DAVIES, R.J., 1988a. *Sheet mulching as an aid to broadleaved tree establishment. I. The effectiveness of various synthetic sheets compared.* Forestry 61(2) : 89-105.

DAVIES, R.J., 1988b. *Sheet mulching as an aid to broadleaved tree establishment. II. Comparison of various sizes of black polythene mulch and herbicide treated spot.* Forestry 61(2) : 107-124.

DORAIS, P., 1991. *Performance des plantations établies dans les forêts publiques du Québec entre 1980 et 1989.* Gouv. du Québec, min. des Forêts. 91 p.

DUBÉ, P.A., J.E. CHEVRETTE et P. LAMB, 1982. *Agrométéorologie. Atlas agroclimatique du Québec méridional, données dérivées de la température.* Gouv. du Québec, min. de l'Agric., des Pêcheries et de l'Aliment. 17 p.

DUMONT, M., 1995. *Plantation des feuillus nobles : guide.* Gouv. du Québec, min. des Ress. nat., Dir. de l'assistance tech. 126 p.

DUMONT, M., 1997. *Le reboisement avec des feuillus : une option judicieuse sur les terres privées.* Gouv. du Québec, min. des Ress. nat., Dir. de l'assistance tech. 20 p.

DUPUIS, M., 1997. *Plantation de feuillus de grande valeur en friche herbacée : impacts éco-physio-morphologiques de diverses méthodes de répression de la végétation.* Univ. Laval, Fac. foresterie et géomatique. Thèse M.Sc. 223 p.

FERLAND, M.G. et R.M. GAGNON, 1974. *Climat du Québec méridional.* Gouv. du Québec, min. des Rich. nat., Dir. générale des eaux, Serv. de la météorologie. 93 p.

FERM, A., J. HYTÖNEN, S. LILJA et P. JYLHÄ, 1994. *Effects of weed control on the early growth of* Betula pendula *seedlings established on an agricultural field.* Scan. J. For. Res. 9 : 347-359.

FLINT, L.E. et S.W. CHILDS, 1987. *Effects of shading, mulching and vegetation control on Douglas-Fir seedling growth and soil water supply.* For. Ecol. Manage. 18 : 189-203.

GORDON, D.R., J.M. WELKER, J.M. MENKE et K.J. RICE, 1989. *Competition for soil water between annual plants and blue oak (*Quercus douglasii*) seedlings.* Oecologia 79 : 533-541.

GRABER, R., 1978. *Summer planting of container-grown northern hardwoods.* U.S.D.A. For. Serv., Northeastern For. Exp. Stn., Durham (NH). Res. Note NE-263. 5 p.

HANNAH, P.R. et T.L. TURNER, 1981. *Growth and survival of yellow birch, sugar maple, and white ash after fall planting.* Tree Plant. Note, 32(4) : 30-32.

HOYLE, M.C., 1984. *Plantation birch: what works, what doesn't.* J. For., Jan. 84 : 46-49.

HUBERT, M., 1981. *Cultiver les arbres feuillus pour récolter du bois de qualité.* Inst. pour le dév. for., Paris. 277 p.

KIRK, R.E., 1982. *Experimental design. Second edition. Procedures for the behavioral sciences.* Brooks/Cole Publ. Co., Belmont, CA. 911 p.

KOLB, T.E. et K.C. STEINER, 1990. *Growth and biomass partitioning response of northern red oak genotypes to shading and grass root competition.* For. Sci. 36(2) : 293-303.

LABRECQUE, P., 1999. *Étude de sensibilité. Programme de valorisation des friches dans les rangs agricoles déstructurés du territoire de la MRC de Papineau.* MRC de Papineau. 156 p.

LAMBERT, F., B. TRUAX, D. GAGNON et N. CHEVRIER, 1994. *Growth and N nutrition, monitored by enzyme essays, in a hardwood plantation: effects of mulching materials and glyphosate application.* For. Ecol. Manage. 70 : 231-244.

MCDONALD, P.M. et O.T. HELGERSON, 1990. *Mulches aid in regenerating California and Oregon forests: past, present and future.* U.S. Dep. Agric., For. Serv., Pacific Southwest Research Station, Gen. Tech. Rep. PSW-123. 19 p.

MCKEAGUE, J.A., 1978. *Manuel de méthodes d'analyse des sols, 2e édition.* Société canadienne de la science du sol. 250 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC, 1994. *Une stratégie, aménager pour mieux protéger les forêts.* Gouvernement du Québec. 197 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC, 1996. *Biodiversité du milieu forestier. Bilan et engagements du ministère des Ressources naturelles.* Gouvernement du Québec. 152 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC, 1999. *Le plant résineux à racines nues – Un costaud tout terrain.* Gouvernement du Québec. 3 p.

MUNSON, A.D. et V.R. TIMMER, 1990. *Site-specific growth and nutrition of planted* Picea mariana *in the Ontario Clay Belt. III Biomass and nutrient allocation.* Can. J. For. Res. 20 : 1165-1171.

NAMBIAR, E.K.S., 1990. *Interplay between nutrients, water, root growth and productivity in young plantations.* For. Ecol. Manage. 30 : 213-232.

NAMBIAR, E.K.S. et R. SANDS, 1993. *Competition for water and nutrients in forests.* Can. J. For. Res. 23 : 1955-1968.

ORLANDER, G., P. GEMMEL et J. HUNT, 1990. *Site preparation: a swedish overview.* B.C. Min. For. et Canada/BC Econ. & Reg. Develop. Agreem. 62 p.

OUIMET (1995). *Nutrition minérale.* p. 52-58. Dans : Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts et gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. L'Érable à sucre. Caractéristiques, écologie et aménagement. Publ. du min. Ress. nat. nº RN95-3050 et Publ. du min. Agric. Pêch. Alim. nº 95-0064. 394 p.

PATRY, A., 1999. *Plantation de feuillus en milieu forestier.* Univ. Laval, Fac. de foresterie et de géomatique. Mémoire. 75 p.

ROBITAILLE, D., 1993a. *Ce que vous devez savoir sur les paillis forestiers.* 1e partie de 2. L'Aubelle 94 : 9-10.

ROBITAILLE, D., 1993b. *Ce que vous devez savoir sur les paillis forestiers.* 2e partie de 2. L'Aubelle 95 : 12-13.

ROBITAILLE, D., 1994a. *Protection des plantations.* p. 123-134. Dans : L'arbre en ville et à la campagne. Pratiques de végétalisation. C. Desmarais Éd. Actes du Colloque. Montréal, 2-3- novembre 1994. 306 p.

ROBITAILLE, D., 1994b. *Rapport annuel. Station d'acquisition de données sur les paramètres environnementaux de la Forêt de Drummondville. Dispositif des paillis forestiers.* Gouv. du Québec, min. des Ress. nat., Dir. de la recherche. Rapport interne. 113 p.

ROBITAILLE, D., 1995. *Régénération artificielle et plantation.* p. 343-358 dans Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts et gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. L'Érable à sucre. Caractéristiques, écologie et aménagement. Publ. du min. Ress. nat. nº RN95-3050 et Publ. du min. Agric. Pêch. Alim. nº 95-0064. 394 p.

SANDS, R. et D.R. MULLIGAN, 1990. *Water and nutrient dynamics and tree growth.* For. Ecol. Manage. 30 : 91-111.

SAS INSTITUTE INC., 1999. *SAS OnlineDoc, Version 8.* Cary, N.C.

SEARLE, S.R., G. CASELLA et C.H. MCCULLOCH, 1992. *Variance components.* Wiley & Sons, New York, 501 p.

SINCLAIR, W.A., H.H. LYON et W.T. JOHNSON, 1987. *Diseases of trees and shrubs.* Cornell University Press. Ithaca. 574 p.

STOUT, S.L., 1986. *22-year growth of four planted hardwoods.* North. J. Appl. For. 3(2) : 69-72.

TELEWSKI, F.W., 1995. *Wind-induced physiological and developmental responses in trees.* p. 237-263 dans Wind and Trees. Cambridge University Press.

TRUAX, B., 1995. *Restauration écologique des forêts de feuillus par plantation.* dans : Potvin, C. et D. Cantin (Éd.). Bilan de la santé des forêts du Québec. 15 p.

TRUAX, B. et D. GAGNON, 1994. *Réduction de l'utilisation des phytocides en plantation d'arbres feuillus de valeur par l'utilisation de friches d'espèces arborescentes pionnières comme sites potentiels de reboisement.* Gouv. du Québec, min. des Ress. nat., Dir. de la recherche forestière. Rapport interne. 17 p.

TRUAX, B. et D. GAGNON, 1993. *Effects of straw and black plastic mulching on the initial growth and nutrition of butternut, white ash and bur oak.* For. Ecol. Manage. 57 : 17-27.

TRUAX, B., D. GAGNON et N. CHEVRIER, 1994. *Nitrate reductase activity in relation to growth and soil N forms in red oak and red ash planted in three different environments: forest, clear-cut and field.* For. Ecol. Manage. 64 : 71-82.

TRUAX, B., F. LAMBERT et D. GAGNON, 2000. *Herbicide-free plantations of oaks and ashes along a gradient of open to forested mesic environments.* For. Ecol. Manage. 137(1-3) : 155-169.

VON ALTHEN, F.W., 1971. *Site preparation and weed control in white ash and black walnut afforestation.* Can. For. Serv., Dept. Fisheries and Forestry, For. Res. Lab. Ontario Region. Inf. Rep. O-X-153. 13 p.

VON ALTHEN, F.W., 1977. *Planting sugar maple: fourth-year results of an experiment on two sites with eight soil amendments and three weed control treatments.* Can. For. Serv., Dept. Fisheries and Envir., Great Lakes For. Res. Stn., Sault-Ste-Marie (ON). Rep. O-X-257. 10 p.

VON ALTHEN, F.W., 1979. *Guide relatif à la plantation des bois durs sur les terres agricoles abandonnées au sud de l'Ontario.* Serv. can. des Forêts. Centre de recherche forestière des Grands-Lacs, Sault-Sainte-Marie. 43 p.

VON ALTHEN, F.W., 1983. *Effects of age and size of sugar maple planting stock on early survival and growth.* Tree Plant. Note 34(3) : 31-33.

VON ALTHEN, F.W., 1984. *Mowing versus mechanical or chemical weed control in sugar maple afforestation.* Tree Plant. Note 35(3) : 28-31.

VON ALTHEN, F.W., 1990. *Guide révisé relatif à la plantation des bois durs sur les terres agricoles abandonnées au sud de l'Ontario. Forêts Canada - Région de l'Ontario.* Centre de foresterie des Grands-Lacs, Sault-Sainte-Marie. 90 p.

VON ALTHEN, F.W. et D.P. WEBB, 1980. *Planting of sugar maple on abandonned farmland in southern Ontario.* p. 354-373. Dans : Garrett et Cox (eds). Proc. Central Hardwood Forest Conference III. Univ. of Missouri, Columbia, Sept. 16-17, 1980.

WAGNER, R.G., L.J. BUSE, R.A. LAUTENSCHLAGER, F.W. BELL, C. HOLLSTEDT, S. STROBL, A. MORNEAULT, W. LEWIS et M.T. TER-MIKAELIAN, 1995. *Vegetation management alternatives program annual report 1994-1995.* Ontario Min. Nat. Res. et Ontario For. Res. Inst. 99 p.

WAGNER, R.G., L.J. BUSE, R.A. LAUTENSCHLAGER, F.W. BELL, S. STROBL, A. MORNEAULT, C. HOLLSTEDT, S. PICKERING et M.T. TER-MIKAELIAN, 1994. *Vegetation management alternatives program annual report 1993-1994.* Ontario Min. Nat. Res. et Ontario For. Res. Inst. 92 p.

WALINGA, I., J.J. VAN DER LEE, V.J.G. HOUDA, W. VAN VARK et I. NOVOZAMSKY, 1995. *Plant analysis manual.* Kluwer Academic Publishers.

WALSH, L.M., 1971. *Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue.* Soil Science Society of America, inc., Madison, Wisconsin, USA. 222 p.

YAWNEY, H.W., 1982. *Planting sugar maple.* p. 53-60. Dans : Sugar maple research: sap production, processing, and marketing of maple syrup. U.S.D.A., For. Serv., Northeastern For. Exp. Stn., Broomall (PA). Gen. Tech. Rep. NE-72. 109 p.

Direction de la recherche forestière

Forêt Québec
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418.643.7994
Télécopieur : 418.643.2165

Site Web : http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche
Courriel : recherche.forestiere.publications@mrnfp.gouv.qc.ca

En couverture 1 - Lac du Cordon près de Saint-Jovite
- Érablière à Tilleul et Hêtre, Forêt de Gatineau
Photographies, Zoran Majcen

- Pédon lac Laflamme

En couverture 4 - Forêt résineuse
- Ordinateur de terrain pour l'enregistrement de mesures

La Direction de la recherche forestière a établi un réseau de plantations expérimentales de feuillus nobles afin de fournir aux producteurs et conseillers forestiers des informations essentielles à leur établissement, à leur aménagement et à leur protection. Les résultats qui découlent de ces recherches peuvent servir, notamment, à choisir les essences et les modèles de plantation en fonction des caractéristiques des sites de même qu'à déterminer les traitements sylvicoles, de protection et d'éducation des plantations de feuillus les plus appropriés.

Ressources naturelles, Faune et Parcs
Québec

ISBN 2-550-41523-X
F.D.C. 441 (047.3) (714)
L.C. SD 397.H3
2003-3097

© Gouvernement du Québec
On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence